



Joana Brilhante das Neves

Licenciatura em Engenharia Biomédica

Desenvolvimento de um Concentrador Solar Fixo para Foto-Estimulação

Dissertação para obtenção do grau de Mestre
em Engenharia Biomédica

Orientador: Professor, Doutor Dawei Liang, FCT/UNL

Juri:

Presidente: Professor, Doutor Mário Forjaz Secca, FCT/UNL

Arguente: Professor, Doutor Paulo Ferreira Ribeiro, FCT/UNL

Vogal: Professor, Doutor Dawei Liang, FCT/UNL



**FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA**

Outubro de 2011

Desenvolvimento de um Concentrador Solar Fixo para Foto-Estimulação

Copyright em nome de Joana Neves, da FCT/UNL e da UNL.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa tem o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

“The proud mission of those who have been able to receive education must be to serve, in seen and unseen ways, the lives of those who have not had this opportunity.”

Daisaku Ikeda

Agradecimentos

Agradeço, em primeiro lugar, ao meu orientador, o professor Dawei Liang pelo seu apoio, orientação e amizade.

Agradeço à Joana Almeida e ao Bruno Couto, os meus companheiros de laboratório, pela cooperação, companhia e amizade.

Agradeço ao Professor Orlando Teodoro e ao Sr. Mesquita por me terem ajudado na fase do projecto sobre os LEDs.

Agradeço ao Sr. Eduardo e ao Faustino pela ajuda na oficina de física, na altura da maquinação de algumas peças.

Agradeço ao Michele por tão gentilmente ter preparado o cimento necessário para a construção do molde do concentrador.

Agradeço à família Guanabara, à Lia, à Marta, à Mélanie e à Teresa, que me aturaram nos piores momentos mas que estiveram sempre do meu lado (também não podiam ir para muito longe porque moramos juntas). Ajudaram a equilibrar a minha vida nestas semanas de clausura e sempre me deram força para acabar o trabalho para mais depressa me juntar a elas.

Agradeço aos meus amigos e a todos os membros da SGI que me apoiaram e encorajaram.

Por fim, e não menos importante, agradeço do fundo do meu coração, aos meus pais por me terem apoiado mais do que nunca nesta fase final do curso, e por sempre acreditarem em mim.

Resumo

Com este trabalho pretendeu-se desenvolver um protótipo que emitisse luz vermelha, de 660 nm de c.d.o., de forma a poder testá-la num alvo biológico e assim confirmar a sua eficácia no desenvolvimento de tecidos vivos.

Ao longo do tempo de duração deste trabalho foram simulados, no programa de design óptico Zemax®, vários protótipos de emissores de luz vermelha, tais como: LEDs vermelhos, lentes de Fresnel com aberração cromática e concentradores de luz solar, posteriormente filtrada, de formas diversas. Com todos estes estudos, concluiu-se que a solução mais viável, em vários aspectos, seria a construção de um concentrador cónico com um filtro que deixasse passar apenas a luz desejada na extremidade.

Descoberto o esquema ideal para o projecto, deu-se início à construção do concentrador cónico através de um processo de moldagem, pela maquinaria de um molde interior, por torneamento de um cilindro de PVC, e um molde exterior de cimento.

Com o concentrador construído, estudou-se a eficiência de transmissão do mesmo bem como a de três filtros ópticos, cada um transmitindo apenas uma gama de c.d.o. centrados em 650 nm, 660 nm e 850 nm, respectivamente.

Por último, procedeu-se à aplicação da luz projectada em plantas a fim de se estudar o seu desenvolvimento como resposta às três radiações de c.d.o. diferentes. Os resultados obtidos mostram que a luz solar concentrada e filtrada pode ser usada para acelerar o crescimento de plantas, em particular quando filtrada com o filtro que transmite principalmente o c.d.o. de 660 nm.

Palavras-Chave: Concentrador, Filtro Óptico, Radiação Solar, 660 nm, 650 nm, 850 nm, Plantas.

Abstract

The bottom line of this work is to design and build a prototype that would be able to emit red light with 660 nm wave length, and test it in a biological target in order to confirm its efficiency in the development of live tissues.

Throughout the study and using the optical design software Zemax®, several red light emitting prototypes were simulated, such as: red LEDs, Fresnel lenses with chromatic aberration and various forms of sunlight concentrators, with a subsequently light filtration. At the end it was concluded that the most viable solution would consist in a conic concentrator, armed with a filter designed to only transmit the desired light.

Following the establishment of the ideal project scheme, the construction of the conical concentrator took place through a molding process, by machining the interior of a mold, sculpting a PVC cylinder, and building a cement exterior mold.

Once finished, the concentrator's transmission efficiency and the three optical filters, each transmitting only one of the following ranges of wave length, 650 nm, 660 nm and 850 nm, were studied.

Finally, the light concentrated and emitted through those three filters was applied in plants, in order to study their development in response to the three different wave length radiations. The results obtained show that the concentrated and filtered sunlight can be used to accelerate the growth of plants, in particular when filtered with a filter that transmits mainly the 660 nm wave length.

Keywords: Concentrator, Solar Radiation, Optical Filter, 660nm, 650 nm, 850 nm, Plants.

Índice de Matérias

1	INTRODUÇÃO	1
2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	3
2.1	RADIAÇÃO SOLAR.....	3
2.2	INTERACÇÃO DA LUZ COM TECIDOS BIOLÓGICOS	5
2.2.1	<i>Parâmetros associados à foto-estimulação.....</i>	<i>5</i>
2.2.2	<i>Influência da Luz na Respiração Celular.....</i>	<i>9</i>
2.3	A LUZ NA MEDICINA.....	12
2.4	A LUZ NAS PLANTAS	13
2.5	SEPARAÇÃO DE COR.....	17
2.5.1	<i>Lente de Fresnel.....</i>	<i>17</i>
2.5.2	<i>Prismas.....</i>	<i>18</i>
2.5.3	<i>Filtros Ópticos.....</i>	<i>19</i>
2.6	CONCENTRADOR ÓPTICO.....	21
2.6.1	<i>Compound Parabolic Concentrator (CPC).....</i>	<i>21</i>
3	ANÁLISE DE VÁRIAS HIPÓTESES DE ESTUDO	25
3.1	MATRIZ DE LEDS	25
3.2	LENTE DE FRESNEL	28
3.3	CONCENTRADOR ÓPTICO.....	31
4	DESCRIÇÃO E OPTIMIZAÇÃO DO SISTEMA ÓPTICO EM ZEMAX®	33
4.1	ANÁLISE NÃO-SEQUENCIAL E TRAÇADO DE RAIOS	33
4.2	RADIAÇÃO SOLAR - PARÂMETROS DA FONTE DE LUZ.....	34
4.2.1	<i>Programação da Fonte de Luz no traçado de raios não-sequencial.....</i>	<i>35</i>
4.3	OPTIMIZAÇÃO DO CONCENTRADOR SOLAR	36
4.3.1	<i>Escolha dos Parâmetros do Concentrador.....</i>	<i>37</i>
4.3.1.1	<i>Irradiância</i>	<i>37</i>
4.3.1.2	<i>Material</i>	<i>37</i>
4.3.1.3	<i>Forma.....</i>	<i>38</i>
4.3.1.4	<i>Altura.....</i>	<i>44</i>
4.4	ESTUDO EM ZEMAX® DA EFICIÊNCIA DE TRANSMISSÃO DO CONCENTRADOR PROJECTADO.....	47
5	MONTAGEM E ANÁLISE DO CONCENTRADOR E DOS FILTROS.....	49
5.1	PROCESSO DE MONTAGEM DO CONCENTRADOR	49
5.2	EFICIÊNCIA DE TRANSMISSÃO EXPERIMENTAL DO CONCENTRADOR	52

5.3	FILTROS.....	53
6	IRRADIAÇÃO DE TECIDOS BIOLÓGICOS COM LUZ SOLAR FILTRADA	57
6.1	MATERIAL BIOLÓGICO USADO	57
6.2	ESTUDO DO EFEITO DE DIFERENTES TIPOS DE RADIAÇÃO EM PLANTAS	57
6.3	EXPOSIÇÃO DE RESULTADOS	61
7	DISCUSSÃO DE RESULTADOS E PERSPECTIVAS FUTURAS.....	67
8	CONCLUSÕES	69
9	BIBLIOGRAFIA.....	71
ANEXOS.....		75
	ANEXO A - DADOS DA EMISSÃO ESPECTRAL SOLAR.....	75

Índice de Figuras

Figura 2.1: Espectro da radiação solar ⁽⁸⁾	4
Figura 2.2: Efeito da variação da intensidade de luz na cultura de fibroblastos ⁽¹⁶⁾	6
Figura 2.3: Curva de Arndt-Schultz ⁽¹⁶⁾	7
Figura 2.4: Profundidade de penetração da luz na pele humana em função do comprimento de onda ⁽¹⁹⁾	8
Figura 2.5: Espectro de absorção dos principais foto-receptores dos tecidos animais e representação da "Janela terapêutica" ⁽¹³⁾	8
Figura 2.6: Espectro de absorção dos principais pigmentos de uma planta verde típica ⁽²⁰⁾	9
Figura 2.10: Espectro de absorção das duas formas do fitocromo: Fv e Fvl ⁽³⁵⁾	14
Figura 2.8: Esquema em corte exemplificando a forma como uma lente de Fresnel é construída ⁽⁸⁾	17
Figura 2.9: Ilustração da propriedade de aberração cromática de uma Lente ⁽⁴²⁾	18
Figura 2.10: Ilustração da dispersão da luz que atravessa um prisma equilátero ⁽⁴³⁾	18
Figura 2.11: Esquematização de dois tipos de Filtros Ópticos, Absorção e Interferência, respectivamente ⁽⁴⁴⁾	19
Figura 2.12: Espectro de transmissão de um filtro dicróico passa-banda ⁽⁴⁴⁾	20
Figura 2.13: Esquema de um CPC e o comportamento dos raios de luz com um ângulo de incidência igual ao ângulo máximo de aceitação ⁽⁴⁹⁾	22
Figura 2.14: Raios de luz com diferentes ângulos de incidência e respectiva reflexão nas paredes de um CPC ⁽⁴⁵⁾	22
Figura 2.15: Curva de transmissão de um concentrador ideal, C_I , e de um concentrador real, C_R ⁽⁵⁰⁾	23
Figura 2.16: Curva de transmissão de um CPC com um ângulo de aceitação de 16° ⁽⁵¹⁾	23
Figura 3.1: Fotografia do protótipo da matriz de LEDs e do concentrador usados num trabalho anterior ⁽¹³⁾	25
Figura 3.2: Esquema exemplificativo das diferentes disposições dos LEDs.....	26
Figura 3.3: matriz de LEDs hexagonal.....	26
Figura 3.4: Matriz de LEDs hexagonal e concentrador simulados em Zemax.	27
Figura 3.5: Gráfico do Espectro Solar.....	28
Figura 3.6: Curva da variação da distância focal em função do c.d.o, resultante de simulações em Zemax®	30
Figura 3.7: Esquematização da concentração dos raios solares e a sua separação.	30
Figura 4.1: Esquema representativo dos vários tipos de componentes usados neste trabalho (adaptado de ⁽¹³⁾).....	34
Figura 4.2: Ângulo máximo de incidência dos raios solar na superfície terrestre.	35
Figura 4.3: Ilustração do percurso do Sol ao longo do dia.	36
Figura 4.4: Espectro de Reflectância de três materiais: Ag, prata; Al, alumínio e Au, ouro ⁽⁵⁹⁾	37

Figura 4.5: Representação do traçado de raios desde a Fonte ao Detector, no interior do CPC.....	39
Figura 4.6: Análise da potência detectada e a sua distribuição à saída do CPC.....	40
Figura 4.7: Gráfico da Radiância à saída do CPC, em função do ângulo de saída dos raios.	41
Figura 4.8: Concentradores desenhados em AutoCAD 2010®.....	42
Figura 4.9: Imagem do concentrador, em Zemax®, um pouco translúcido para se poder observar a concentração dos raios no seu interior.	46
Figura 4.10: Curva de transmissão do concentrador circular resultante de simulações em Zemax®.....	47
Figura 6.1: Fotografia de uma das plantas da espécie <i>Allium Tuberosum</i> a ser irradiada com luz solar concentrada e filtrada pelo filtro de 660 ± 5 nm.....	58
Figura 6.2: Fotografia de uma planta de controlo sujeita a uma irradiância solar controlada pela introdução de uma folha de cartão com um pequeno orifício.....	60
Figura 6.3: Registo fotográfico do aparato da experiência.....	60
Figura 6.4: Fotografias da planta de estudo sujeita à luz de 650 ± 20 nm, e da respectiva planta de controlo, em cinco dias consecutivos.	62
Figura 6.5: Fotografias da planta de estudo sujeita à luz de 660 ± 5 nm, e da respectiva planta de controlo, em cinco dias consecutivos.	63
Figura 6.6: Fotografias da planta de estudo sujeita à luz de 850 ± 20 nm, e da respectiva planta de controlo, em cinco dias consecutivos.	64
Figura 6.7: Gráfico do crescimento das plantas de estudo em função do c.d.o. a que estiveram sujeitas, e das respectivas plantas de controlo.....	65

Índice de tabelas

Tabela 3.1: Comparação entre as áreas das duas configurações das matrizes de LEDs.....	26
Tabela 3.2: Comparação entre a potência e a irradiância das duas configurações de matrizes de LEDs.	26
Tabela 3.3: Dados para a definição das fontes de luz a serem simuladas em Zemax®	29
Tabela 4.1: Comparação da performance dos vários concentradores consoante a sua forma.....	43
Tabela 4.2: Comparação da performance dos vários concentradores cónicos consoante a sua altura....	45
Tabela 6.1: Valor das doses aplicadas nas plantas de teste através dos diferentes filtros.	59
Tabela 6.2: Valor da área dos orifícios na folha de cartão.	59

Simbologia e Notações

ATP - Adenosina Trifosfato

c.d.o. – comprimento de onda

COX - citocromo c oxidase

CPC - Compound Parabolic Concentrator

DNA - Deoxyribonucleic acid

ERO – Espécies Reactivas de Oxigénio

Fv – Fitocromo vermelho

Fvl – Fitocromo vermelho longínquo

IV – Infravermelho

LASER – Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

LED – Light-Emitting Diode

PVC – Policloreto de Vinil

RNA - Ribonucleic acid

TLBI - Terapia com Luz de Baixa Intensidade

UV – Ultravioleta

V - vermelho

VL – vermelho longínquo

1 Introdução

Num mundo em que se fazem guerras pelo controlo de fontes energéticas, como o petróleo; em que se correm riscos enormes pela utilização de energia nuclear; ou ainda, em que são destruídos milhares de hectares de floresta, paisagens, zonas habitadas ou agrícolas, para a construção de barragens, é gratificante e esperançoso pensar que uma das maiores fontes de energia do planeta é inesgotável e limpa, o Sol. De facto, a quantidade de luz solar que atinge a Terra é tão grande que numa hora supera a o valor da energia consumida por toda a humanidade durante um ano inteiro⁽¹⁾. No entanto, tendo em conta o seu grande potencial, é ainda uma fonte de energia pouco utilizada. Não obstante a sua poderosa energia ser capaz de gerar o movimento de motores (pela sua transformação nos painéis fotovoltaicos), o seu uso delicado pode originar resultados benéficos na saúde das pessoas.

Desde a antiguidade que são conhecidos os benefícios para a saúde da exposição moderada ao Sol. Existem registos na literatura indiana, datados de 1500 A.C., que descrevem um tratamento de áreas da pele sem pigmentação combinando ervas a luz natural do Sol. Também na literatura budista e chinesa, de 200 A.C. e do século X, respectivamente, se encontram registos semelhantes. Com o evoluir da ciência descobriu-se que a luz solar é formada por diferentes tipos de radiação, cada uma com um comprimento-de-onda (c.d.o.) específico. E se, por um lado, alguns desses c.d.o. podem ser prejudiciais à saúde (alguns raios ultravioletas) outros podem ser bastante benéficos, como se tem vindo a descobrir sobre a radiação vermelha com c.d.o. de 660 nm.

Com este trabalho pretendia-se comprovar os efeitos benéficos da radiação de 660 nm na saúde humana desenvolvendo, para isso, um método de filtragem da radiação solar concentrada. No entanto, sabe-se que não é correcto, nem legal, realizar experimentos científicos em pessoas, por mais inofensivos que sejam; e por razões éticas também não foi considerada a experimentação em animais. Por estes motivos, optou-se pela experimentação em plantas. Apesar de serem organismos bastante afastados da linha evolutiva dos animais, e consequentemente do Homem, existe um processo celular comum a ambos que parece estar por detrás dos efeitos benéficos desta radiação – a respiração celular. Por associação, pode-se ainda argumentar que ao procurar novas tecnologias que beneficiem as plantas estão-se a desenvolver novas formas de cultivo mais eficazes das mesmas, o que vai também beneficiar o Homem, quer se tratem de plantas medicinais, matérias-primas ou plantas para consumo.

Nas palavras do pesquisador Dr. Andrzej Slominski: “A vida na Terra, desde o início que tem estado dependente da constante fonte de energia dos gases em chamas no nosso Sol.” De facto, existe uma antiga relação entre a radiação solar e as biomoléculas da vida. No entanto, ainda há muito a aprender sobre essa relação⁽²⁾.

2 Fundamentos Teóricos

Neste capítulo será feita uma análise de conteúdos teóricos sobre os temas que serão abordados de modo a se ter uma melhor compreensão do trabalho realizado.

2.1 Radiação Solar

O Sol é uma estrela que emite constantemente radiação devido ao processo de fusão do seu núcleo⁽⁶⁾. A radiação solar é uma fonte de energia sem custos e não poluente que tem despertado interesse em inúmeras áreas, tais como nas energias renováveis, na iluminação de edifícios ou estufas e, mais recentemente, na medicina.

O Sol é uma estrela de estrutura física algo complexa. É composto por 71% de hidrogénio, 27,1% de hélio e menos de 2% de todos os outros elementos e tem uma massa de $1,99 \times 10^{36}$ kg, o que representa cerca de 99,8% da massa de todo o sistema solar conhecido. Tem um diâmetro de $1,39 \times 10^6$ km e uma distância média da Terra de $1,5 \times 10^8$ km, pelo que não pode ser considerado como uma fonte radial pontual⁽⁶⁾.

Até atingir a superfície terrestre, a radiação solar é influenciada por diversos factores de dispersão provocada por partículas atmosféricas e de absorção devido à camada de ozono, vapor de água e outras substâncias químicas. Estes factores alteram a intensidade da radiação solar à medida que esta atravessa a atmosfera. No entanto, a maior parte da radiação solar (aproximadamente 70%) atinge a superfície terrestre⁽⁷⁾. Na figura seguinte está ilustrado o espectro da radiação solar.

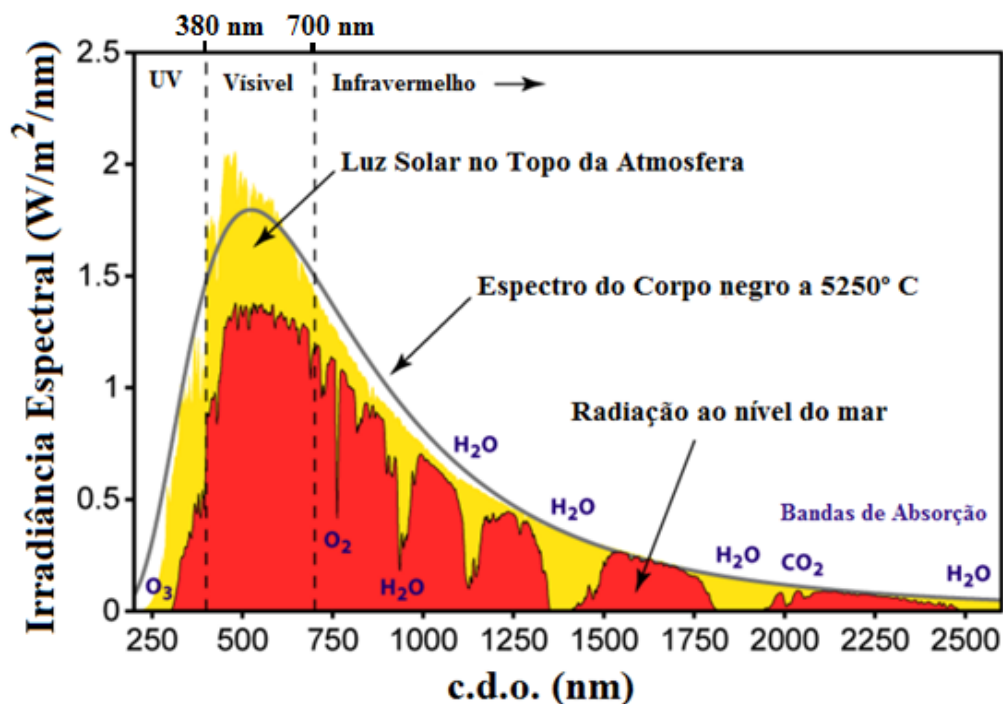


Figura 2.1: Espectro da radiação solar⁽⁸⁾.

A radiação electromagnética, proveniente do Sol, pode abranger a gama do espectro entre o ultravioleta e o infravermelho, tal como está representado na figura Figura 2.1. Estas radiações possuem energias que não são suficientes para ionizar átomos ou moléculas, dizem-se, por isso, não-ionizantes⁽⁹⁾.

A quantidade de energia proveniente do Sol que atinge a superfície da Terra é cerca de 5.6×10^{21} W por ano. Isto equivale aproximadamente a 1000 W/m^2 , todos os dias. Esta energia é tão grande que seria suficiente para cobrir todas as necessidades energéticas dos habitantes da Terra por um período de 30 anos. Obviamente, não existem meios concebíveis para aproveitar toda esta energia disponível, nem seria necessário. A conversão de uma pequena fracção desta energia em energia utilizável já seria de enorme valor⁽¹⁰⁾.

Apenas nas últimas décadas a humanidade começou a desenvolver mecanismos para aproveitar o enorme potencial da energia solar. Esta preocupação surgiu do contínuo aumento do consumo de energia, dos crescentes problemas ambientais provocados pelos combustíveis usados hoje em dia, e pela consciência do inevitável esgotamento dos recursos fósseis dos quais as civilizações modernas se tornaram tão dependentes⁽¹⁰⁾.

2.2 Interacção da Luz com Tecidos Biológicos

Os efeitos da luz sobre tecidos biológicos são conhecidos há já bastante tempo. É sabido que a radiação solar é uma fonte de energia impulsionadora de algumas transformações em tecidos biológicos. Além de possibilitar aos seres vivos manter temperaturas para os quais os processos metabólicos podem ocorrer, é também fonte de energia para as próprias reacções. Nos organismos foto-autotróficos¹, a energia solar visível, dos IV e dos UV, é convertida em energia livre de compostos estáveis. As plantas verdes, as algas e algumas bactérias fazem uso da energia radiante na região do visível e de alguns UV para a síntese de compostos ricos em energia, tais como a glucose⁽¹¹⁾. Mas, desde a segunda metade do século XIX que existem registos de efeitos da radiação electromagnética, de vários c.d.o. na região do visível, sobre organismos e células não foto-autotróficos. No entanto, foi apenas no início da década de 60 do século XX, com a produção do primeiro LASER de Hélio-Néon, que a aplicação da luz ganhou intensidade em várias áreas do conhecimento humano, com especial atenção na medicina⁽¹²⁾. A invenção do LASER tornou possível obter luz bastante coerente² e com c.d.o. bem definidos (monocromática) o que facilitou o estudo dos efeitos biológicos da radiação de zonas específicas do espectro electromagnético.

2.2.1 Parâmetros associados à foto-estimulação

Dos principais fenómenos físicos associados à interacção da luz com a matéria destacam-se: a transmissão, reflexão, dispersão e absorção. Estes fenómenos têm particular importância quando se pretende estudar do efeito da luz nos tecidos biológicos. Mas para além destes fenómenos, os efeitos biológicos nos tecidos dependem das características da radiação electromagnética incidente, tais como: a irradiância, o tempo de irradiação, a dose e o comprimento-de-onda. Além disso, estão também dependentes do ângulo de incidência do feixe luminoso e das características do tecido⁽¹³⁾.

A **Irradiância**, densidade de potência, ou ainda intensidade da radiação, é a quantidade de energia que atinge uma determinada área de tecido biológico por tempo de exposição, sendo geralmente medida em W/cm^2 quando utilizada no âmbito da foto-estimulação⁽¹⁴⁾.

$$I = \frac{P}{A} (W/cm^2) \quad (1)$$

¹ Produzem os seus próprios nutrientes através da fotossíntese⁽⁷²⁾.

² A luz diz-se coerente quando é formada por ondas com a mesma direcção e frequência e que se encontram constantemente em fase⁽⁶⁶⁾.

Quanto mais curto for o tempo de exposição, maior deverá ser a irradiância a fim de alcançar energia suficiente para obtenção do mesmo efeito. Na prática, se a irradiância for mais baixa do que um determinado limite para um dado tecido-alvo, não ocorrerá foto-estimulação, mesmo que haja aumento do tempo de exposição, podendo, pelo contrário, ocorrer foto-inibição⁽¹⁵⁾.

A influência da intensidade da luz nas células irradiadas foi demonstrada em vários estudos, um deles refere-se à cultura de fibroblastos³ e o seu resultado está representado no gráfico da figura Figura 2.2.

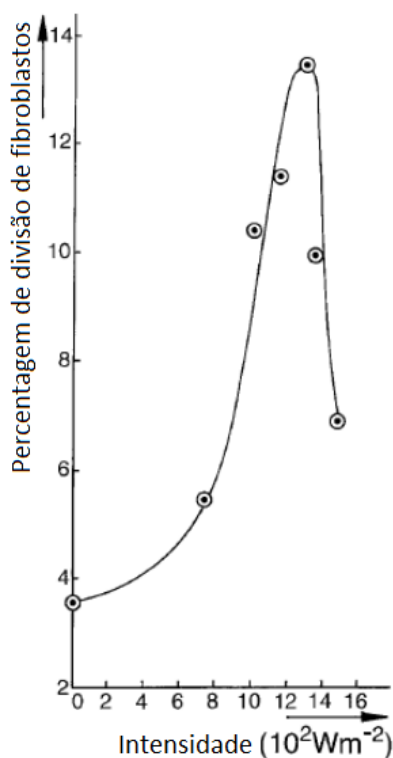


Figura 2.2: Efeito da variação da intensidade de luz na cultura de fibroblastos⁽¹⁶⁾.

O gráfico da Figura 2.2 retrata a percentagem da divisão de fibroblastos, 24h depois de serem irradiados com uma luz com c.d.o. de 540 nm a uma dose constante de $4 \times 10^4 \text{ J/m}^2$. Este estudo demonstrou que existe uma janela terapêutica de intensidade de luz *in vitro*, entre os $8 \times 10^{-2} \text{ W/m}^2$ e os $16 \times 10^{-2} \text{ W/m}^2$ ⁽¹⁶⁾, onde se verifica que houve uma maior taxa de divisão de fibroblastos, o que pode ser interessante na cicatrização de feridas. Observações em pacientes também revelaram que existe um limiar na intensidade da luz (presumivelmente dependente do c.d.o.) que tem que ser superado para se obter efeitos terapêuticos nas células. No entanto, não existe documentação clínica sobre os valores precisos deste limiar⁽¹⁶⁾.

³ Os fibroblastos são um tipo de células animais que sintetizam colagénio e componentes da matriz extracelular, pelo que têm um papel muito importante na cicatrização de feridas⁽⁶⁸⁾.

A **dose**, ou fluência, é definida pela energia transmitida por um feixe luminoso por unidade de área e é medida, geralmente, em J/cm^2 . Este parâmetro é também designado de densidade de energia, sendo dado pelo produto entre a irradiância, I , e o tempo de exposição, T_E , à radiação:

$$D = I \times T_E \quad (2)$$

Para que haja um efeito positivo no tecido, a quantidade de dose a ser aplicada deve ter em conta a patologia e a profundidade do tecido a tratar ⁽¹⁷⁾.

Vários estudos sobre o efeito da dose de uma fonte de luz nas células levaram à construção de um gráfico designado curva de Arndt-Schultz.

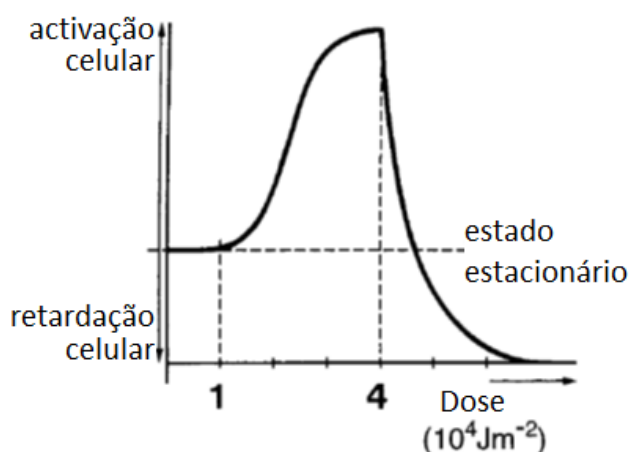


Figura 2.3: Curva de Arndt-Schultz ⁽¹⁶⁾.

Esta curva mostra os diferentes níveis de reacção que uma célula pode ter quando é irradiada. Quando a densidade de energia é demasiado pequena, não existem efeitos observáveis, no entanto, densidades de energia muito elevadas podem levar à inibição das funções celulares ⁽¹⁶⁾.

Uma reacção fotobiológica envolve a absorção de um **comprimento-de-onda** específico por moléculas foto-receptoras, ou cromóforos. Diferentes c.d.o. são absorvidos por cromóforos diferentes. Na região do visível e infravermelho próximo, a penetração do feixe luminoso nos tecidos, animais e vegetais, é tanto maior quanto maior for o comprimento-de-onda ⁽¹⁸⁾.

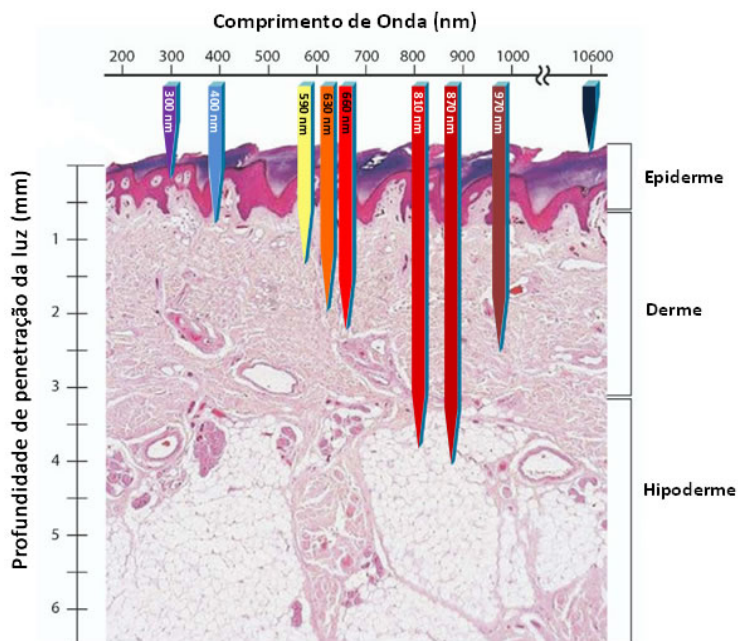


Figura 2.4: Profundidade de penetração da luz na pele humana em função do comprimento de onda ⁽¹⁹⁾.

Os tecidos biológicos são formados por cerca de 70% de água e 30% de moléculas biológicas. Os principais cromóforos existentes no organismo humano são a hemoglobina (Hb) e a melanina, os quais possuem bandas de absorção intensas em c.d.o. abaixo dos 600 nm, tornando-se num obstáculo à absorção de fótons abaixo desta gama. A água é transparente na gama do visível mas absorve no infravermelho e no ultravioleta ⁽¹⁵⁾. Por esta razão, existe uma gama de c.d.o. chamada de "janela terapêutica", de 600 nm a 950 nm (Figura 2.5), que cobre os c.d.o. que não são absorvidos por estes cromóforos, e assim conseguem penetrar mais profundamente nos tecidos biológicos.

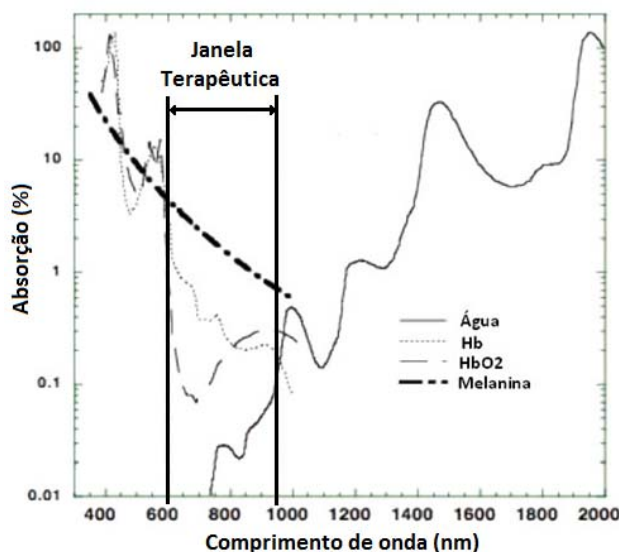


Figura 2.5: Espectro de absorção dos principais foto-receptores dos tecidos animais e representação da "Janela terapêutica" ⁽¹³⁾.

Nas plantas os principais cromóforos são as clorofilas e os carotenóides. Estas moléculas absorvem a energia proveniente de luz com c.d.o. específicos que depois é utilizada no processo de fotossíntese.

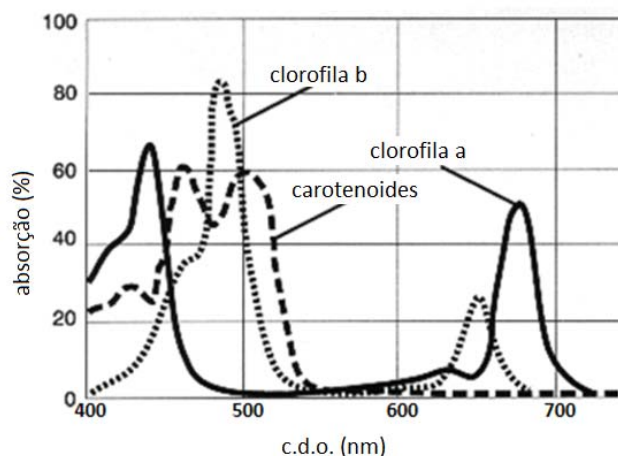


Figura 2.6: Espectro de absorção dos principais pigmentos de uma planta verde típica⁽²⁰⁾.

Pela análise da Figura 2.6, a “janela terapêutica” nas plantas poderá ser na gama de c.d.o. entre os 520 nm e os 670 nm, e acima dos 690 nm, c.d.o, estes, que não são absorvidos pelos pigmentos fotossintéticos.

2.2.2 Influência da Luz na Respiração Celular

Sabe-se, actualmente, que existe um mecanismo fotobiológico universal da acção da luz na cadeia respiratória das células eucarióticas, tanto animais como vegetais, bem como nas células procarióticas. Esta cadeia respiratória, também chamada de cadeia transportadora de electrões, existe nas membranas internas das mitocôndrias⁴ e é uma das etapas da respiração celular⁽¹²⁾. Muitas pesquisas indicam que a luz vermelha de baixa intensidade, bem como a infravermelha próxima, actuam nas células através de um foto-receptor primário - o citocromo c oxidase - a enzima terminal da cadeia transportadora de electrões^{(2) (18) (21)}.

⁴ As mitocôndrias são organelos celulares, sendo uns dos mais importantes pois é onde se dá a respiração celular⁽²²⁾.

A respiração celular é um processo pelo qual a energia dos hidratos de carbono é transferida para o ATP⁵, a molécula universal que transporta energia, tornando-se disponível para as necessidades energéticas imediatas da célula. Quanto mais activa for uma célula, mais numerosas são as suas mitocôndrias e as cristas existentes no seu interior ⁽²⁴⁾.

No processo da respiração celular, para além de serem produzidas moléculas de ATP, também são produzidas Espécies Reactivas de Oxigénio⁶ (ERO) que interagem com as moléculas na célula alterando o seu potencial redox. Este potencial é definido pela afinidade das moléculas aos electrões ⁽²¹⁾⁽²⁾. A perda de um electrão é conhecida como oxidação, e o ganho de um electrão como redução. A oxidação e a redução ocorrem simultaneamente, uma vez que um electrão perdido por um átomo é captado por outro, daí a designação redox ⁽²⁴⁾. O potencial redox de uma célula é, assim, o balanço delicado entre os níveis das ERO produzidas durante o metabolismo celular e a expulsão das mesmas por mecanismos antioxidantes. Em alguns tipos de células, as ERO têm demonstrado o seu efeito em algumas funções celulares, particularmente em processos que asseguram a homeostasia⁷ e o controlo da proliferação. Nas plantas, os cloroplastos, que também possuem cadeias transportadoras de electrões, são a maior fonte de EROs ⁽²⁾⁽²⁴⁾.

Quando o citocromo c oxidase (COX) é estimulado por luz de baixa intensidade, de c.d.o. a que ele é sensível, o transporte de electrões na cadeia respiratória é acelerado, levando a um aumento da produção de ATP e de EROs ⁽²⁾⁽¹⁸⁾. Para além do aumento do fornecimento de energia, as alterações no estado redox levam à activação de várias vias de sinalização intracelulares que regulam a síntese de ácidos nucleicos, síntese proteica, activação de enzimas e progressão do ciclo celular ⁽¹⁸⁾. Por sua vez, estas reacções primárias levam a alterações celulares e bioquímicas que culminam em efeitos macroscópicos como, por exemplo, ao aumento da taxa de proliferação celular, ao aumento da vascularização, à aceleração da cicatrização de feridas e à modulação de inflamações crónicas ⁽¹²⁾⁽¹⁸⁾⁽²⁵⁾. Desta forma, as Terapias com Luz de Baixa Intensidade (TLBI) parecem ter grande potencial na estimulação da proliferação, da homeostasia celular e na cicatrização de feridas ⁽²⁾.

No entanto, estes efeitos terapêuticos da luz estão sempre dependentes do tipo de célula, da fase de crescimento em que esta se encontra, bem como das condições de oxidação/redução que lhe estão associadas. Assim, o potencial redox inicial nas células irradiadas parece influenciar a fotossensibilidade das mesmas⁽²⁾. Algumas células em estados redox inicial mais reduzidos, tais como aquelas que estão cronicamente inflamadas, são mais sensíveis às terapias com luz de baixa intensidade. De facto, há estudos que indicam que os efeitos positivos das TLBI ocorrem apenas em células danificadas, não se

⁵ ATP, ou adenosina trifosfato, é uma molécula que armazena energia proveniente dos processos de respiração celular e da fotossíntese, para consumo imediato nas células ⁽⁶⁹⁾.

⁶ ERO são moléculas de oxigénio quimicamente reactivas. Neste caso, resultam do percurso incompleto de electrões na cadeia respiratória que se ligam directamente ao oxigénio em vez de culminarem na contribuição da formação de ATP ⁽⁷⁰⁾.

⁷ Homeostasia é a propriedade de um sistema que regula o ambiente interno, neste caso da célula, e tende a manter condições constantes de temperatura, PH, concentração de sais, etc. ⁽⁶⁷⁾.

observando qualquer efeito no benefício das células saudáveis^{(26) (18)}. Nestas células sensíveis, a TLBI poderá proporcionar a formação de mais ERO o que pode ser necessário para promover a proliferação celular, ou, em alguns casos, acelerar mecanismos antioxidantes⁸. Neste cenário, este processo proporcionaria energia e regulação necessárias para restaurar a homeostasia e melhorar o funcionamento celular⁽²⁾.

O citocromo c oxidase é considerado o principal foto-receptor nas células dos mamíferos, para radiações na gama do vermelho ao infravermelho próximo. Esta afirmação vem de estudos que demonstraram que os espectros de absorção do Cox são muito semelhantes aos espectros de ação para as respostas biológicas à luz de baixa intensidade – com picos de absorção entre os 630 e os 900 nm⁽¹⁸⁾. Um trabalho recente identificou quatro picos no espectro de ação das TLBI: 613.5 - 623.5 nm, 667.5 - 683.7 nm, 750.7 - 772.3 nm e 812.5 - 846.0 nm⁽¹⁸⁾. Estudos mais recentes identificaram, ainda, dois picos de absorção do citocromo c oxidase, um deles na região do vermelho – 660 nm - e o outro na região do infravermelho próximo - 850 nm⁽¹⁵⁾.

Outro parâmetro bastante importante na TLBI é a dose aplicada. A dose de luz que é usada depende da patologia a ser tratada, e em particular da profundidade a que se encontra no tecido. Para c.d.o. vermelhos, as doses frequentemente aplicadas em doenças bastante superficiais tendem a variar entre 1 a 10 J/cm², sendo 4 J/cm² a dose mais usual. Doses de c.d.o. no infravermelho próximo tendem a ser aplicadas em lesões mais profundas e o seu valor varia entre 10 a 50 J/cm². A terapia com luz geralmente é repetida todos os dias, e um tratamento completo pode durar cerca de duas semanas⁽¹⁸⁾.

Em estudos anteriores foi evidenciado que a resposta celular à foto-estimulação não está associada a propriedades específicas da luz LASER, como a coerência. Isto abriu espaço para o trabalho com outros tipos de fontes emissoras de luz não coerente, como os LED e até mesmo a radiação solar⁽¹²⁾.

No entanto, as TLBI permanecem controversas. Isto deve-se a duas razões principais: em primeiro lugar, os mecanismos bioquímicos subjacentes aos efeitos positivos destas terapias não estão totalmente compreendidos. Portanto, perceber o papel dos mecanismos redox e da sua sinalização pode ser útil para o estudo de terapias futuras⁽²⁾. Em segundo lugar, a complexidade da escolha racional entre um grande número de parâmetros de iluminação, como o c.d.o., fluência, densidade de potência, estrutura de pulso e sincronismo de tratamento levou à publicação de uma série de estudos negativos, bem como de muitos positivos. No entanto, tem sido frequentemente observado que a resposta a baixos níveis de doses de luz tem um efeito muito mais positivo do que os níveis mais elevados⁽¹⁸⁾.

⁸ Mecanismos antioxidantes são mecanismos que bloqueiam a oxidação de moléculas importantes na célula evitando a sua danificação pelas ERO. Algumas vitaminas e minerais têm esta propriedade, daí a sua importância na saúde⁽⁷⁴⁾.

2.3 A Luz na Medicina

Na secção anterior foi feita uma pequena abordagem sobre a influência benéfica da luz na respiração celular e, conseqüentemente, na proliferação celular e cicatrização de feridas, pelo que não é de espantar que o uso da luz tenha vindo a tornar-se cada vez mais corrente na medicina.

Os efeitos da exposição corporal à luz branca ou colorida, assim como as suas conseqüências no estado de saúde física e psíquica começaram a ser estudados no século XIX, mas só foram aprofundados no século XX. A fototerapia, baseada na interacção da luz com a matéria viva, desenvolveu-se e foi seriamente adoptada como fonte de terapia para diversas doenças, como por exemplo, o lúpus, no início do século XX. Nos primeiros anos do mesmo século, em praticamente todo o mundo desenvolvido, o entusiasmo pela fototerapia e pelo seu estudo era grande. A sua popularidade pode ser avaliada pela frequência com que, a partir dos primeiros anos desse século, as pessoas começaram a frequentar as praias, não só para tomar banhos de mar mas também, e sobretudo, para se expor aos raios solares que supostamente “davam saúde” e, além disso, uma atraente cor bronzeada ⁽¹⁾.

A cromoterapia, fototerapia com luz monocromática visível, e a actinoterapia, que usa a luz ultravioleta (UV), tiveram grande desenvolvimento, mas com o passar dos anos criou-se bastante polémica em torno de todas estas terapias, especialmente depois de se descobrirem os efeitos prejudiciais de doses excessivas da radiação UV ⁽¹⁾.

Actualmente, várias técnicas envolvendo as propriedades da luz como, reflexão, dispersão, transmissão, entre outras, estão a ser amplamente utilizadas em diagnósticos biomédicos, desenvolvimento de técnicas não invasivas e no tratamento de enfermidades em vários ramos da medicina, como dermatologia, oftalmologia, oncologia, entre outros ⁽¹²⁾. A pesquisa neste campo, entretanto, ainda está no início. Entre as possíveis aplicações da luz, a utilização de LASERs de baixa potência, ou LEDs, e a sua aplicação no tratamento de úlceras já encontra vários registos na literatura. Existem bastantes estudos que evidenciam efeitos terapêuticos das luzes de c.d.o. de 660 nm, que foram demonstrados no tratamento de úlceras em indivíduos com diabetes, com recurso a terapia com LEDs, e no melhoramento de feridas *in vivo*, com indução da libertação de factores de crescimento ⁽¹³⁾.

Existem três principais áreas de medicina e veterinária onde as TLBI têm um papel importante a desempenhar: a cicatrização de feridas, reparação e prevenção da morte de tecidos; o alívio da inflamação nas doenças crónicas e das dores e edemas associados a ferimentos; e o alívio da dor neurogénica nalguns problemas neurológicos. A TLBI podem propiciar um recurso terapêutico opcional aos convencionais tratamentos ou ser utilizada em conjunto com os mesmos, com a vantagem do seu baixo custo e eficiência comprovada ⁽¹⁸⁾⁽¹²⁾.

2.4 A Luz nas Plantas

A luz é provavelmente o mais complexo e variável factor do ambiente ao qual as plantas estão sujeitas. Como fonte de energia primária, a luz é, não só, indispensável à vida das plantas e do seu crescimento, como afecta também a morfologia das mesmas. Muitos estudos mostram que tanto a intensidade como a qualidade da luz são factores importantes para o crescimento, desenvolvimento, pigmentação e forma das plantas ⁽²⁷⁾.

A qualidade da luz refere-se à cor, ou comprimento-de-onda, que atinge a superfície das plantas. A luz vermelha e azul têm maior impacto no crescimento das mesmas. Já a luz verde é a menos eficiente. De facto, a reflexão da luz verde é o que dá a cor às plantas ⁽²⁸⁾.

As plantas usam primeiramente a luz para a obtenção de energia através do processo de fotossíntese. Este tem lugar nos cloroplastos⁹ onde existem pigmentos que absorvem c.d.o. específicos: as clorofilas e os carotenóides. Como se pode verificar na Figura 2.6 da secção 2.3.1, as clorofilas absorvem principalmente a radiação vermelha e azul, reflectindo a verde, enquanto os carotenóides reflectem a luz do amarelo ao vermelho, absorvendo a radiação violeta, azul e verde ^{(2) (29) (24)}.

A fotossíntese ocorre durante as horas de luz diurnas. Os produtos da fotossíntese são usados directamente pelas células fotossintéticas para a biossíntese e são também convertidos num açúcar de baixo peso molecular (geralmente a sacarose), que é exportado para suprimir as necessidades metabólicas das outras células não fotossintéticas da planta ⁽²¹⁾. Durante os períodos escuros, quando não há fotossíntese, as mitocôndrias são essenciais para a produção de ATP em células de plantas fotossintéticas e durante todo o tempo em raízes e outros tecidos não fotossintéticos ⁽³⁰⁾. Os citocromos c oxidase existem nas cadeias transportadoras de electrões das mitocôndrias assim como na dos cloroplastos ⁽³¹⁾.

Em muitos modelos de crescimento e desenvolvimento vegetal a luz era vista apenas como um recurso consumível e as plantas eram assumidas “cegas” para sinais luminosos do meio ambiente. No entanto, a percepção desses sinais pelas plantas é agora bem documentada e considera-se que a qualidade da luz tem um papel fundamental na arquitectura da planta e na dinâmica da vegetação ⁽³²⁾. Para além dos pigmentos fotossintéticos, e do citocromo c oxidase, já referido na secção 2.3.2, existem outras famílias de foto-receptores nas plantas superiores que têm influência no seu desenvolvimento e as ajudam a adaptar-se ao meio ambiente: os fitocromos, os criptocromos e as fototropinas ^{(32) (33) (31)}.

⁹ Cloroplastos são organelos celulares, presentes nas células fotossintéticas, onde se encontra a cadeia transportadora de electrões da fotossíntese ⁽⁷⁵⁾.

Os criptocromos absorvem fótons no ultravioleta A (UV-A) e na luz azul, sendo activos dentro da gama de 390 a 530 nm com uma resposta bastante plana entre 390 e 480 nm, enquanto que as fototropinas mostram um claro pico de actividade a 450 nm^{(32) (33)}.

Os fitocromos podem ocorrer nas plantas de duas formas diferentes: o Fv (fitocromo vermelho), que quando absorve a luz vermelha converte-se em Fvl; e o Fvl (fitocromo vermelho longínquo) que quando absorve a radiação de vermelho longínquo converte-se em Fv. Após a absorção de radiação vermelha ou vermelha longínqua, é estabelecido um equilíbrio entre estas duas formas. Este equilíbrio, denominado como foto-equilíbrio do fitocromo (ϕ), determina as respostas das plantas à luz do meio ambiente e é expresso como a razão entre a concentração de Fvl e de Fv^{(33) (34) (32)}. O espectro de absorção destas duas formas que os fitocromos podem tomar está representado na figura seguinte.

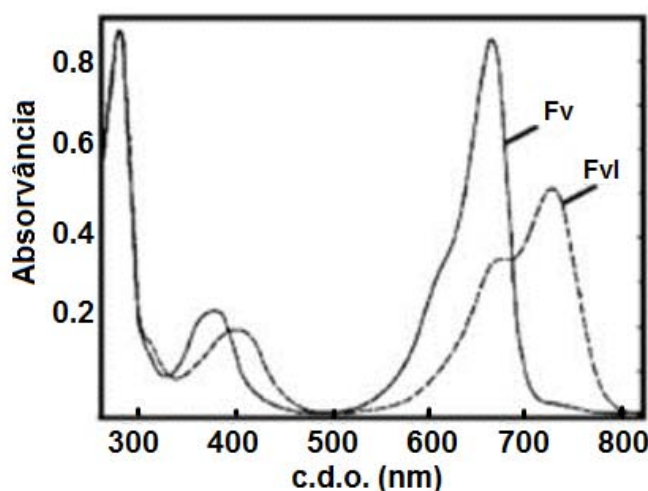


Figura 2.7: Espectro de absorção das duas formas do fitocromo: Fv e Fvl⁽³⁵⁾.

Analisando estes espectros, pode-se verificar que os fitocromos também absorvem algumas radiações ultravioletas. O Fv tem uma absorção máxima nos 660 nm, enquanto o Fvl tem uma absorção máxima nos 730 nm^{(32) (31)}.

Na natureza a conversão de Fv em Fvl, e vice-versa, ocorre lentamente ao longo dos períodos luminosos, durante o dia, e escuros, durante a noite. O Fvl é a forma activa e inibe a floração nas plantas de dias curtos sob condições nas quais ocorreria normalmente. Nas plantas de dias longos, o Fvl promove a floração sob condições apropriadas⁽²⁴⁾. Este pigmento é responsável pelo foto-periodismo nas plantas, isto é, a conversão do fitocromo em função da luz vermelha e vermelha longínqua constitui um dos mecanismos medidores do tempo, o relógio biológico das plantas⁽²⁴⁾⁽³¹⁾.

Para melhorar a sua adaptação ao meio, as plantas “sentem” as condições de luz e moldam os seus processos de desenvolvimento através do uso de um conjunto destes foto-receptores, principalmente os

fitocromos e os criptocromos. Os fitocromos induzem uma larga gama de respostas foto-morfogénicas tais como a germinação das sementes e floração. Os criptocromos controlam o fototropismo¹⁰ das raízes nalgumas espécies de plantas, bem como a sua arquitectura e a taxa de crescimento⁽³⁶⁾.

O controlo do crescimento de plantas, assim como de plântulas *in vitro*, através da alteração da qualidade da luz é uma opção bastante vantajosa em relação aos métodos convencionais de controlo com químicos, e tem-se tornado numa técnica importante na cultura de tecidos vegetais. Diferentes tipos de sistemas de luzes artificiais são usados em pesquisas no campo da agricultura. Uma das fontes de luz mais usadas para estas pesquisas são os LEDs, pelo seu baixo custo e pelo facto de fornecer luz com espectros de emissão bastante estreitos e centrados em c.d.o. bem definidos⁽³⁷⁾⁽³⁸⁾⁽³⁹⁾.

Vários estudos com LEDs mostram que as plantas debaixo de luzes vermelhas, de 660 nm, crescem mais depressa, uma vez que esta luz pode estimular, para além da respiração celular, a resposta dos fitocromos nas plantas, que leva, por exemplo, ao alongamento do caule^{(38) (37) (40)}. A luz vermelha é importante para o desenvolvimento do aparelho fotossintético das plantas e pode aumentar a acumulação de amido inibindo a translocação de produtos da fotossíntese para fora das folhas⁽⁴⁰⁾. Por outro lado, a luz azul é importante na formação da clorofila, desenvolvimento de cloroplastos, síntese de enzimas, activação do ritmo circadiano¹¹ de fotossíntese e foto-morfogénese⁽⁴⁰⁾.

É sabido que a luz azul estimula o crescimento assimétrico e a inclinação das plantas na sua direcção. De facto, vários estudos demonstraram, ainda, que a luz azul inibe fortemente o alongamento das plantas^{(38) (37)}. Um exemplo desta particularidade pode ser observado no caso das plântulas, cujo caule, quando se encontra ainda debaixo de terra, tem um crescimento muito rápido, mas quando emerge do solo, este é fortemente inibido pela luz branca, que tem grande percentagem de luz azul^{(38) (37)}.

Há, no entanto, evidências que mostram que as plantas debaixo de uma combinação de luz vermelha, 660 nm, e azul, 450 nm, podem tornar-se mais fortes, apesar de não crescerem tanto como aquelas debaixo de luzes monocromáticas de c.d.o. de 660 nm⁽³⁸⁾. A luz vermelha promove o crescimento das folhas mas não o aumento da clorofila, pelo que a concentração desta diminui⁽³⁸⁾. É de salientar que as respostas fisiológicas a mudanças espectrais podem variar entre diferentes espécies de plantas⁽⁴⁰⁾.

A combinação de luz vermelha com alguma percentagem de luz azul parece ser vantajoso para o crescimento das plantas. Estudos sobre a fracção desta luz mostram que existe um valor mínimo ideal, e

¹⁰ É a designação dada ao movimento dos seres vivos, especialmente das plantas, com destaque para o girassol; em resposta a estímulos luminosos⁽⁷⁷⁾.

¹¹ Ou ciclo circadiano, designa o período de aproximadamente um dia (24 horas) durante o qual se desenrola todo o ciclo biológico de qualquer ser vivo influenciado pela luz solar⁽⁷⁸⁾.

que para maiores percentagens de luz azul o efeito nas plantas passa a ser parecido com o efeito da luz branca nas mesmas. No entanto, resultados conclusivos ainda não foram encontrados^{(38) (27)}.

Estudos apontam, ainda, a luz azul como a principal responsável pelo controlo do crescimento das folhas das plantas, já a luz vermelha, quando combinada com a luz azul, estimula o florescimento⁽²⁸⁾.

Para além da qualidade da luz, a dose de irradiação também afecta o crescimento das plantas e a sua morfogénese, assim como o tamanho e o número de folhas e caules⁽³⁸⁾. A resposta dos fitocromos a elevadas radiações requer uma exposição prolongada ou contínua e a resposta é proporcional à dose de radiação até um certo nível⁽³¹⁾. No entanto, existem poucos dados na literatura sobre as doses de radiação aplicadas no estudo do efeito da luz nas plantas. Um estudo indica doses na ordem dos 25 J/cm² quando usada a técnica de filtragem da luz solar com filtros coloridos⁽³³⁾.

O crescimento das plantas pode ser medido de várias formas. O maior componente do crescimento destas é a expansão celular impulsionada pela pressão de turgor¹². O crescimento também pode ser medido em termos de alteração de peso fresco da planta, que é o peso do tecido vivo ao longo de um período específico de tempo. No entanto, o peso fresco das plantas que crescem no solo oscila em resposta a mudanças da quantidade de água disponível. Nesta situação, medições de peso seco são frequentemente mais apropriadas. O número de células é um parâmetro comum e conveniente para medir o crescimento de organismos unicelulares, como algumas algas, mas nas plantas multicelulares pode haver divisão de células sem que haja aumento no volume⁽³¹⁾. O crescimento das plantas pode também ser descrito em termos espaciais e materiais. Assim, a melhor forma de descrever o seu desenvolvimento, e o que será também adoptado neste trabalho, é o registo fotográfico⁽³¹⁾.

Existem muitos estudos sobre os efeitos da luz no crescimento das plantas, usando diferentes fontes de luz, tanto artificiais como a luz do Sol filtrada com filtros coloridos. No entanto, não foi encontrado nenhum estudo que usasse a luz solar concentrada para estes fins, pelo que esta será a inovação a apresentar neste trabalho. Para obter apenas as radiações desejadas, foram usados três filtros ópticos para filtrar a luz solar concentrada, que transmitem, respectivamente, bandas de c.d.o. centrados em 650 nm, 660 nm e 850 nm.

¹² Turgor é a força exercida pela água contida numa célula vegetal contra a sua parede celular. Esta pressão dá a rigidez à planta e ajuda a mantê-la erecta⁽⁷³⁾.

2.5 Separação de cor

Para testar determinados comprimentos de onda do espectro solar é preciso isolá-los dos demais. Nesta secção são descritas algumas técnicas de separação de cor e as suas vantagens e desvantagens.

2.5.1 Lente de Fresnel

As lentes de Fresnel são um tipo de lentes que foram produzidas inicialmente para instalar em faróis de sinalização, já que as lentes convencionais eram muito volumosas e caras. A qualidade da imagem produzida por uma lente de Fresnel é muito pior do que a de uma lente normal. Porém, o facto das lentes de Fresnel serem muito finas faz com que a luz perdida por absorção seja muito menor, tornando-as muito úteis em aplicações de concentração de luz⁽⁸⁾.

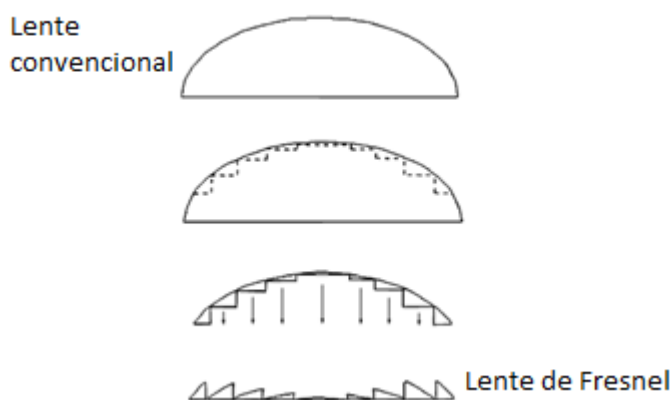


Figura 2.8: Esquema em corte exemplificando a forma como uma lente de Fresnel é construída⁽⁸⁾.

Para além de serem bons concentradores de luz, as lentes de Fresnel possuem uma propriedade interessante no que respeita à separação de cores. Esta propriedade, designada de aberração cromática, permite que radiações diferentes tenham um ângulo de refacção também diferente, dependendo do seu c.d.o. Assim, quando a luz branca atravessa uma lente, os seus componentes são refractados de acordo com o seu c.d.o. Na maioria dos vidros, e outros materiais de que são feitas as lentes, o índice de refacção é maior para c.d.o. mais curtos (luz azul) e diminui à medida que aumenta o c.d.o.⁽⁴¹⁾. Desta forma, as radiações com c.d.o. menores (ex: luz azul com c.d.o. próximo dos 450 nm) são mais refractadas, e o seu foco será mais próximo da lente, enquanto que as radiações com c.d.o.

mais longos (ex: luz vermelha com cerca de 660 nm) terão um foco mais longe pois são menos refractadas ⁽⁴²⁾.

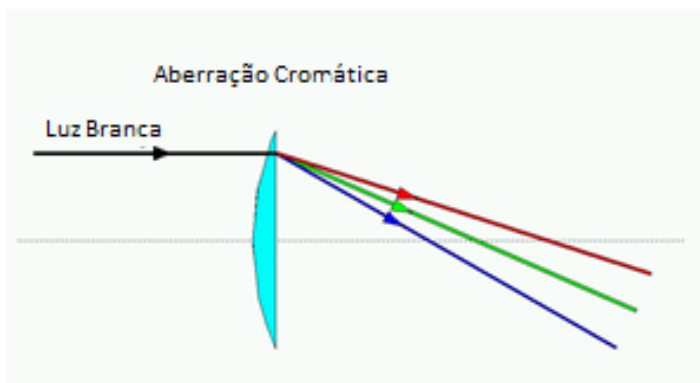


Figura 2.9: Ilustração da propriedade de aberração cromática de uma Lente ⁽⁴²⁾.

Esta característica, que pode ser uma desvantagem nalguns casos, é uma grande vantagem para o presente trabalho.

2.5.2 Prismas

Quando a luz branca atravessa um prisma equilátero, dá-se o fenómeno de dispersão, o qual se caracteriza pela refração diferenciada da luz, consoante o c.d.o. dos seus componentes ⁽⁴³⁾. Ao mudar de um meio para o outro (de ar para vidro) a luz muda a sua velocidade. Como resultado, o seu caminho é refractado e parte dela é reflectida ⁽⁷⁾.

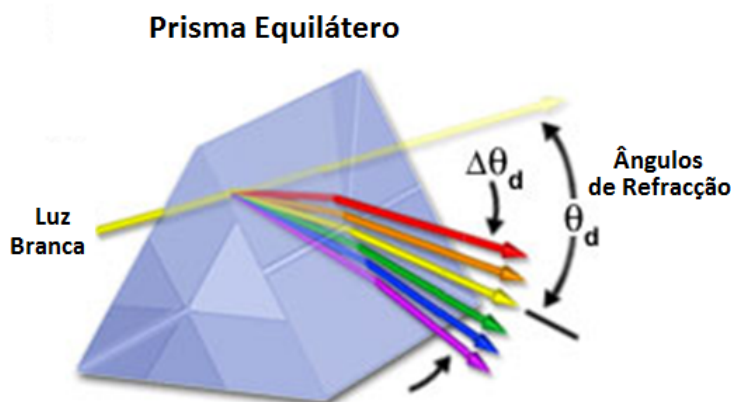


Figura 2.10: Ilustração da dispersão da luz que atravessa um prisma equilátero ⁽⁴³⁾.

A grande diferença entre este método e a aberração cromática das lentes de Fresnel consiste no facto destas últimas concentrarem a luz separada em focos distintos, enquanto o prisma simplesmente dispersa os vários c.d.o. em diferentes regiões. Para além disso, só radiação com ângulos de divergência pequenos pode ser separada com sucesso por prismas, o que torna este método desvantajoso para este projecto.

2.5.3 Filtros Ópticos

Os filtros ópticos são geralmente construídos com vidro tingido, ou plástico, ao qual são aplicados revestimentos específicos que filtram as frequências de luz indesejadas. Ao controlar a espessura e o número de camadas de revestimento, é possível controlar a largura da banda de comprimento-de-onda que são transmitidos ⁽⁷⁾.

Os dois tipos de filtros ópticos mais comuns são os filtros de absorção, que absorvem os c.d.o. indesejados, e os filtros de interferência, que removem determinados c.d.o. por reflexão ⁽⁴⁴⁾.

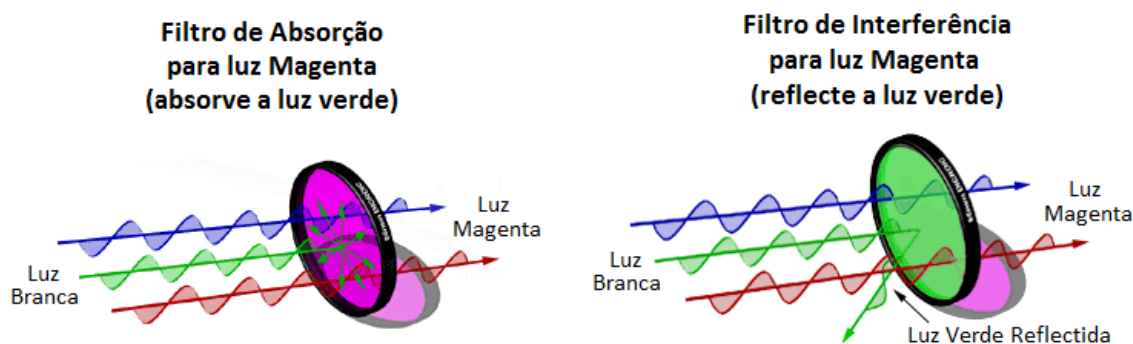


Figura 2.11: Esquematização de dois tipos de Filtros Ópticos, Absorção e Interferência, respectivamente ⁽⁴⁴⁾.

Os filtros de absorção atenuam a luz através da absorção de c.d.o. específicos. Assim a performance espectral é uma função da espessura do filtro e da quantidade de corante presente no vidro ou na matriz de gelatina, que por vezes o constitui. Uma das vantagens dos filtros de absorção feitos de vidro é o seu baixo custo, alta estabilidade e independência do ângulo de incidência da luz de entrada. As principais desvantagens são a variedade limitada de vidros disponíveis para aplicações de filtros, desempenho espectral dependente da espessura do filtro e autofluorescência de alguns tipos de vidro ⁽⁴⁴⁾.

Os filtros de Interferência são também conhecidos pelo termo filtros dicróicos (*di* = dois, *cróico* = cor), pelo facto de apresentarem uma cor pela luz transmitida e outra pela luz reflectida. No caso do filtro

dicróico magenta, ilustrado na Figura 2.11, a luz verde é reflectida pela superfície do filtro e a luz magenta é transmitida para o outro lado, fazendo com que ambas as faces apresentem cores distintas. Estes filtros são construídos por multicamadas de revestimento de películas finas que são depositadas em vácuo no vidro.

Existem quatro tipos de design básico de filtros: passa-alto, passa-baixo, passa-banda e filtro *notch*. Os filtros passa-alto e passa-baixo deixam passar apenas c.d.o. altos, ou baixos, respectivamente. Os filtros dicróicos passa-banda são os mais comuns e são desenhados para transmitir apenas determinados c.d.o.⁽⁴⁴⁾. O diagrama da Figura 2.12 ilustra o espectro de transmissão de um filtro dicróico passa-banda típico.

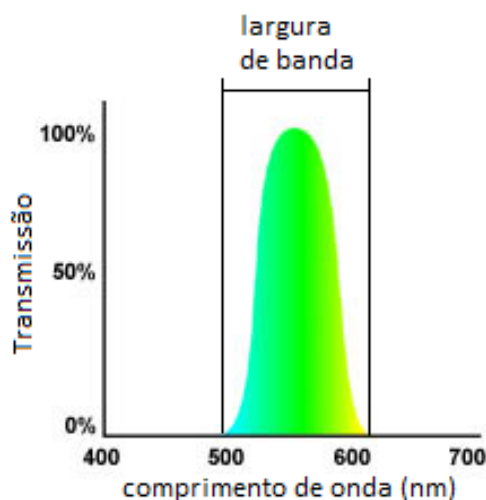


Figura 2.12: Espectro de transmissão de um filtro dicróico passa-banda⁽⁴⁴⁾.

O espectro da Figura 2.12 ilustra os c.d.o. que são transmitidos pelo filtro e a respectiva percentagem de transmissão. O c.d.o. com máxima transmissão é 550 nm, no centro da banda passante. A largura de banda deste tipo de filtros define, tal como o nome indica, a amplitude de comprimentos-de-onda que serão permitidos passar. Estes filtros são muito mais precisos e eficientes do que os filtros de absorção porque, teoricamente, não existe passagem de c.d.o. indesejados.

Por fim, os filtros *notch* são o oposto dos filtros passa-banda, isto é, eliminam a banda dos c.d.o. indesejados.

Por tudo isto, os filtros ópticos são o método mais eficaz e preciso para separar as cores da luz solar. Apesar de serem mais dispendiosos que os restantes métodos apresentados nesta secção, foram os escolhidos para este trabalho.

2.6 Concentrador Óptico

O concentrador óptico é um componente essencial neste projecto, uma vez que o objectivo é aplicar numa pequena área de tecido biológico uma maior potência de luz vermelha do que aquela que receberia se fosse simplesmente exposto ao Sol.

2.6.1 Compound Parabolic Concentrator (CPC)

Neste projecto o concentrador estudado foi desenvolvido com base na teoria dos concentradores ópticos não formadores de imagem (*nonimaging*¹³), nomeadamente no princípio dos raios marginais (*edge ray principle*). Este princípio estipula que se os raios de luz que vêm da extremidade da fonte são redireccionados para a extremidade do alvo, então, todos os raios vindos do interior da fonte atingirão o alvo⁽⁴⁵⁾.

Aplicando este método à construção de um concentrador, este é feito de tal forma que os raios de luz que entram no dispositivo com um ângulo máximo são direccionados, após pelo menos uma reflexão, para a margem da abertura de saída⁽⁴⁶⁾. Desta forma, assegura-se que todos os raios que entram no concentrador com um ângulo de incidência igual ou inferior ao seu ângulo máximo de aceitação serão direccionados para a outra extremidade do concentrador.

Um concentrador *nonimaging* é essencialmente um funil. A luz que entra no concentrador por uma grande área é reflectida de forma a passar por uma área muito mais pequena. O processo destrói qualquer imagem da fonte de luz, no entanto este facto é irrelevante quando apenas é desejada concentração⁽⁴⁶⁾.

Concentradores ideais, que alcançam uma máxima performance na concentração, têm sido estudados em duas-dimensões por muitos investigadores. Em meados dos anos sessenta do século XX⁽⁴⁶⁾ Winston, Rabl, Bassett & Berrick e Baranov descreveram, em três-dimensões, um concentrador muito próximo do ideal, o cone CPC (*Compound Parabolic Concentrator*)⁽⁴⁷⁾.

O CPC não é, no entanto, um concentrador específico, mas sim uma família de concentradores baseados num princípio geral de design com o fim de maximizar a concentração geométrica para

¹³ Ramo da Óptica, cujo termo em inglês é *nonimaging optics*, trata da optimização da transferência de luz entre uma fonte e um objecto. Ao contrário do tradicional ramo, *imaging optics*, as técnicas desenvolvidas pela *nonimaging optics*, tal como o nome indica, não têm como objectivo formar uma imagem da fonte mas sim optimizar o sistema óptico para uma melhor transferência de radiação de uma fonte para o alvo desejado⁽⁴⁵⁾.

radiação com um determinado ângulo de aceitação ⁽⁴⁸⁾. Na Figura 2.13 está representado um tipo de CPC.

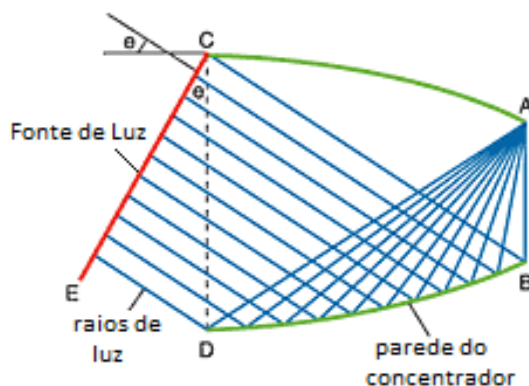


Figura 2.13: Esquema de um CPC e o comportamento dos raios de luz com um ângulo de incidência igual ao ângulo máximo de aceitação ⁽⁴⁹⁾.

O ângulo máximo de aceitação, θ , é a amplitude entre o eixo longitudinal do CPC e a inclinação máxima que um raio de luz pode ter para entrar no concentrador e não ser reflectido para trás. A Figura 2.14 é uma boa esquematização da importância do ângulo de aceitação de um CPC.

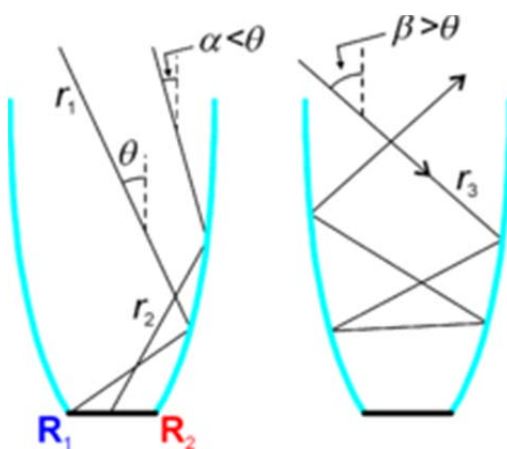


Figura 2.14: Raios de luz com diferentes ângulos de incidência e respectiva reflexão nas paredes de um CPC ⁽⁴⁵⁾.

Outra característica notável de um concentrador ideal é a sua função de transmissão. Esta é determinada pelo quociente entre a potência dos raios à saída do concentrador e a potência dos raios que entraram nele. Na figura seguinte estão representadas as curvas de transmissão de um concentrador ideal e de um concentrador real.

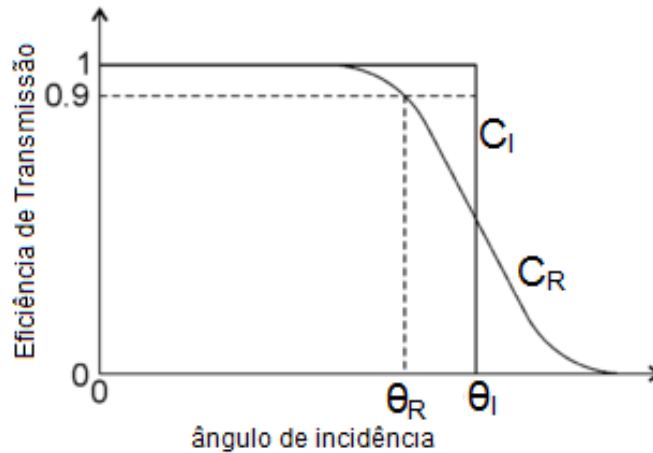


Figura 2.15: Curva de transmissão de um concentrador ideal, C_I , e de um concentrador real, C_R ⁽⁵⁰⁾.

A eficiência de transmissão de um concentrador ideal é 1 para todos os ângulos incidentes inferiores ou iguais a θ_I (ângulo de aceitação máximo do concentrador ideal), e será zero para todos os ângulos superiores a θ_I . No entanto, na prática as curvas de transmissão de concentradores reais decaem de forma mais gradual para ângulos superiores ao ângulo de aceitação para o qual foram projectados, θ_R , seguindo a forma da curva C_R do gráfico da Figura 2.15. Neste caso, o ângulo de aceitação de um concentrador real, θ_R , é, em regra, definido pelo ângulo para o qual a eficiência de transmissão desce para 90% ⁽⁵⁰⁾.

A determinação da curva de transmissão de um concentrador é uma boa maneira de estudar a sua qualidade. Quanto mais próxima for da curva do concentrador ideal, melhor será esse concentrador. No caso dos CPC, esta curva é bastante próxima do ideal, como se pode verificar na Figura 2.16.

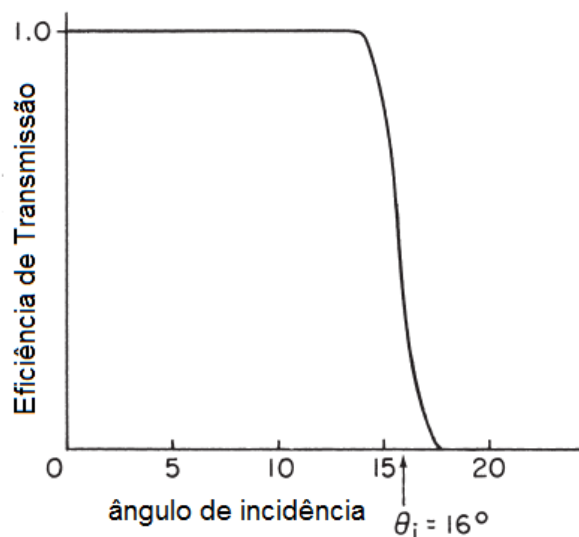


Figura 2.16: Curva de transmissão de um CPC com um ângulo de aceitação de 16° ⁽⁵¹⁾.

A grande gama de ângulos de aceitação que permitem traz incomparáveis vantagens para os CPC em comparação com outros tipos de concentradores, como os espelhos parabólicos ou as lentes de Fresnel. No âmbito dos concentradores solares, uma das consequências mais importantes desta vantagem é a diminuição do efeito da variação do ângulo de incidência dos raios do Sol, ao longo do dia⁽⁴⁸⁾.

Tipicamente, as variáveis de um CPC a otimizar incluem o fluxo de radiação total e a distribuição angular e espacial da radiação óptica à saída do concentrador⁽⁴⁵⁾.

3 Análise de várias hipóteses de estudo

No início do trabalho desta dissertação, tinha-se em vista a construção de um protótipo que emitisse luz vermelha que pudesse ser testada em tecidos biológicos vivos, que fosse de montagem relativamente fácil e com dimensões portáteis. Pelo que foram estudados vários casos possíveis, tendo-se optado por desenvolver experimentalmente apenas o mais viável.

Neste capítulo pretende-se, de uma forma resumida, apresentar o trabalho desenvolvido até ter sido escolhido o estudo a aprofundar nesta dissertação.

3.1 Matriz de LEDs

Em primeiro lugar, ainda antes de passar a estudar um protótipo que aproveitasse a luz do Sol, pensou-se em otimizar a técnica de fototerapia com LEDs (Light Emitting Diode) estudada num trabalho anterior ⁽¹³⁾, onde se usou uma matriz de LEDs de forma quadrangular e também um concentrador de secção quadrada, como se pode ver na figura seguinte.

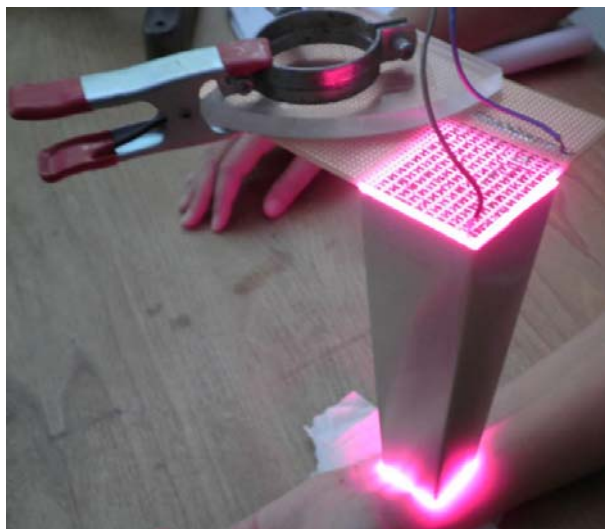


Figura 3.1: Fotografia do protótipo da matriz de LEDs e do concentrador usados num trabalho anterior ⁽¹³⁾.

A fim de criar uma matriz de LEDs otimizada, com uma maior área eficaz, isto é, com uma maior potência por unidade de área, projectou-se uma rede de LEDs, que emitiam luz com c.d.o. de 660 nm, dispostos em hexágono, que mais tarde seria acoplada a um concentrador de secção hexagonal.

Fazendo um pequeno estudo, foi possível verificar que esta pequena mudança de posição dos LEDs aumentaria a área eficaz da matriz:

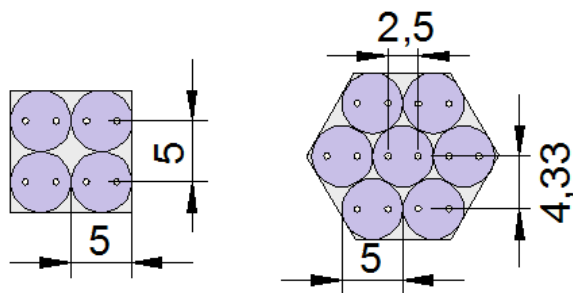


Figura 3.2: Esquema exemplificativo das diferentes disposições dos LEDs.

Tabela 3.1: Comparação entre as áreas das duas configurações das matrizes de LEDs.

Grandezas	Matriz Quadrangular	Matriz Hexagonal
Área da Secção (mm ²)	100	161.6
Área ocupada pelos LEDs (mm ²)	78.54	137.44
Área Eficaz	78.54%	85.05%

É possível verificar, com este pequeno modelo, que esta nova configuração da matriz de LEDs tem um acréscimo de 6.51% em área eficaz.

A matriz usada no trabalho referido ⁽¹³⁾ era constituída por 100 LEDs com encapsulamento de diâmetro igual a 5 mm. Para ter uma matriz de tamanho equivalente mas com forma hexagonal seriam precisos 127 LEDs dispostos da seguinte forma:

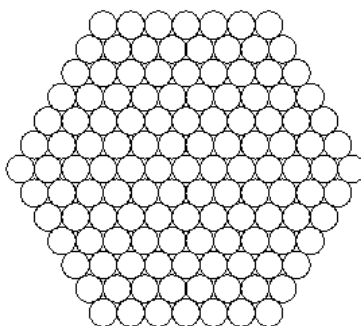


Figura 3.3: matriz de LEDs hexagonal.

Admitindo que 1 LED tem uma potência de 7 mW ⁽¹³⁾, pode-se verificar o seguinte:

Tabela 3.2: Comparação entre a potência e a irradiância das duas configurações de matrizes de LEDs.

Grandezas	Matriz Quadrangular	Matriz Hexagonal
Área da Secção (mm ²)	2500	2809.84
Área ocupada pelos LEDs (mm ²)	1963.50	2493.64
Área Eficaz	78.54%	88.75%
número de LEDs	100	127
Potência total (mW)	700	889
Irradiância (mW/mm ²)	0.28	0.32
Dose (J/cm ²)	25.20	28.47

Teoricamente, a irradiância teria um aumento de 0.04 mW/mm², apesar de parecer pouco significativo parecia valer a pena investir nesta melhoria técnica. No estudo da matriz de LEDs quadrada, a radiação foi aplicada durante 15 min, resultando numa dose de 25.20 J/cm² ⁽¹³⁾. Na matriz de LEDs hexagonal, esta dose seria ligeiramente superior, 28.47 J/cm².

Seguiu-se o estudo em Zemax® desta matriz de LEDs. Foram simulados os 127 LEDs dispostos tal como na Figura 3.3. Para definir cada LED, foi necessário definir vários parâmetros, como a potência, o tipo de fonte e respectiva radiação, tamanho dos LEDs e ângulos de dispersão dos raios.

Foram também desenhados, no programa AutoCAD 2010®, vários concentradores de secção hexagonal, que variavam em comprimento e área de secção da saída, onde se colocaria o detector. Tinha-se como objectivo um estudo exaustivo sobre as dimensões de um concentrador ideal a fim de se obter, na sua saída, uma distribuição de raios de luz o mais homogeneia possível, mantendo uma boa eficiência de transmissão.

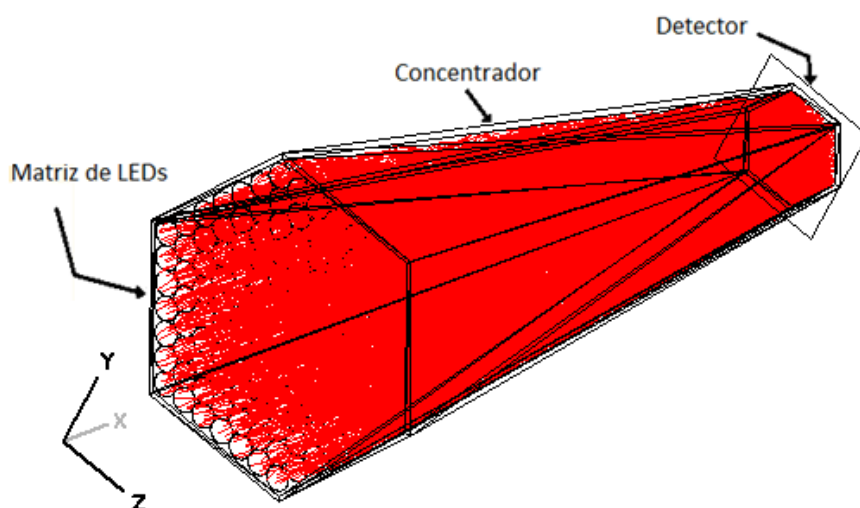


Figura 3.4: Matriz de LEDs hexagonal e concentrador simulados em Zemax.

Em simulação no Zemax® foi possível provar a eficiência deste método. No entanto, quando se deu início à montagem da matriz de LEDs surgiu um problema que não tinha sido previsto. Com esta nova disposição dos LEDs, o espaçamento entre duas fileiras de pins deixa de ser 5 mm, e passa a ser 4.33 mm, como ilustra a Figura 3.2. Esta pequena diferença faz com que os LEDs deixem de poder encaixar nas placas eléctricas standard disponíveis, sendo a única solução a construção de uma placa personalizada. Como esta solução se mostrou tecnicamente inviável por vários factores, entre eles o facto de o único técnico que sabia trabalhar com a máquina de impressão de circuitos já não se encontrar a trabalhar na faculdade, decidiu-se abordar uma outra solução.

3.2 Lente de Fresnel

De seguida optou-se por estudar a técnica de separação de cor através da propriedade de aberração cromática de uma lente de Fresnel.

Esta propriedade, descrita na secção 2.6.1, permite separar os diferentes c.d.o. da luz do Sol.

Para simular a aberração cromática da lente de Fresnel no programa Zemax® foi necessário definir a fonte de luz que representaria a radiação solar, com todos os seus componentes. Tal como mencionado na secção 2.2, a radiação solar é composta por radiações que diferem em c.d.o. e chegam à superfície terrestre com diferentes potências. Com os dados retirados do espectro solar padrão para AM1.5⁽⁵²⁾ foi possível construir, em Microsoft Excel®, um gráfico bastante pormenorizado do espectro solar:

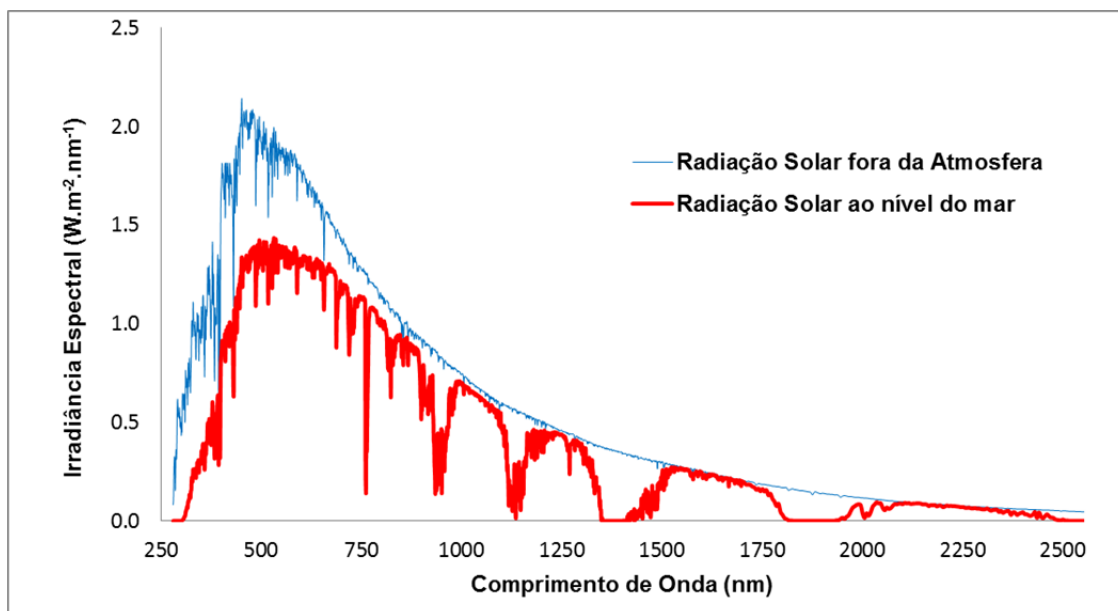


Figura 3.5: Gráfico do Espectro Solar.

A partir do gráfico da Figura 3.5 foram calculados os pesos de vários intervalos de c.d.o. relativamente ao espectro total. A zona correspondente à luz visível, sendo a mais interessante para este projecto, foi dividida em intervalos mais curtos de forma a obter-se uma melhor resolução na sua simulação.

Para determinar a potência de cada intervalo foi primeiro medida, experimentalmente, a irradiância total da radiação solar, tendo-se obtido um valor bastante próximo do valor típico terrestre de 900W/m^2 . Esta irradiância correspondente a uma potência total de 254.5 W , que atravessou uma lente de Fresnel, com 80 cm de diâmetro, usada na medição, de forma a concentrar uma grande quantidade de luz solar no medidor de potência. Multiplicando este valor pelo peso relativo de cada intervalo chegou-se à potência de cada c.d.o. Desta forma foi construída a Tabela 3.3 que serviu de base para a definição de 16 fontes de radiação a serem simuladas no programa Zemax[®]. A informação sobre a cor correspondente de cada tipo de radiação foi retirada de ⁽⁵³⁾.

Tabela 3.3: Dados para a definição das fontes de luz a serem simuladas em Zemax[®].

Ordem	Intervalo de c.d.o. (nm)		c.d.o. central (nm)	Peso relativo	Potência (W)	Nome da Radiação
1	300	350	325.00	0.90	2.286	Ultravioleta
2	350	393.5	371.75	2.14	5.437	Ultravioleta
3	393.5	431	412.25	3.58	9.122	Violeta
4	431	486	458.50	7.50	19.074	Azul
5	486	517	501.50	4.61	11.741	Azul Claro
6	517	589	553.00	10.75	27.351	Verde
7	589	656	622.50	9.36	23.819	Laranja
8	656	687	671.50	4.20	10.685	Vermelho
9	687	719	703.00	4.02	10.228	Vermelho Escuro
10	719	750	734.50	3.74	9.509	Infravermelho
11	750	823	786.50	7.89	20.074	Infravermelho
12	823	934	878.50	9.70	24.686	Infravermelho
13	934	1135	1034.50	11.63	29.595	Infravermelho
14	1135	1352	1243.50	8.59	21.863	Infravermelho
15	1412	1815	1613.50	7.79	19.816	Infravermelho
16	1945	2500	2222.50	3.61	9.183	Infravermelho

Com as 16 fontes de luz definidas foi simulada uma lente de Fresnel por onde a radiação passava. Para cada uma destas fontes foi feito um estudo em Zemax[®] sobre a distância entre a lente de Fresnel (que neste caso tinha 80 cm de diâmetro) e o seu foco. Deste estudo resultou o gráfico seguinte.

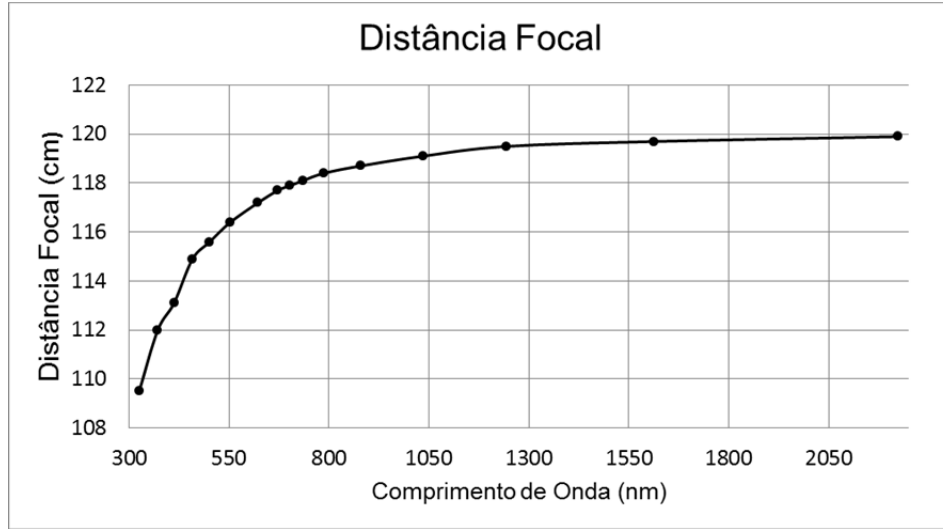


Figura 3.6: Curva da variação da distância focal em função do c.d.o., resultante de simulações em Zemax®.

É interessante analisar este gráfico onde se verifica que para comprimentos de onda mais curtos a distância focal varia significativamente, mas à medida que o c.d.o. aumenta a distância focal pouco varia. Este facto é vantajoso no âmbito deste trabalho uma vez que se pretende obter luz vermelha isolada, e esta pertence à gama dos c.d.o. mais curtos, sensivelmente entre os 650 nm e os 700 nm.

Feita esta análise, foi iniciado o estudo da separação das cores da luz solar. Depois de muitas simulações chegou-se a um esquema que parecia ter a melhor separação de cores possível, esquema esse representado na figura seguinte, onde cada cor simboliza raios com c.d.o. diferentes.

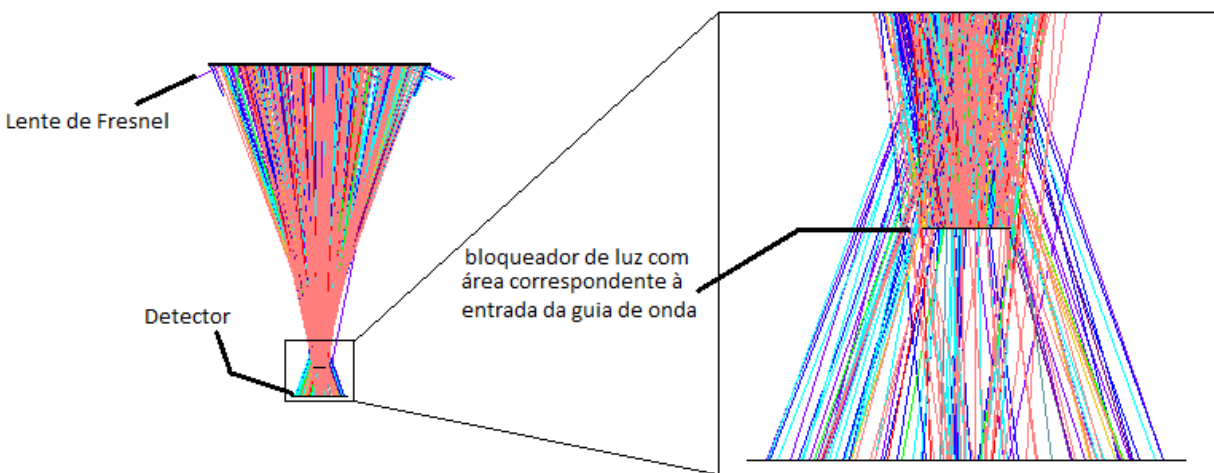


Figura 3.7: Esquemática da concentração dos raios solares e a sua separação.

Como se pode verificar na Figura 3.7, o objecto colocado no foco da luz vermelha bloqueia a passagem de uma grande percentagem desta radiação, no entanto a separação não é 100% eficaz visto haver alguma contaminação de luz não vermelha nesta área. O objecto colocado tinha a área da secção de uma guia de onda que serviria para conduzir a luz vermelha para longe da influência das restantes radiações. Para além de alguma luz vermelha “escapar” ao objecto, há ainda grande contaminação de outros tipos de luz nessa área.

Mesmo sabendo da baixa eficácia deste método, decidiu-se construir o seu protótipo a fim de verificar experimentalmente os seus resultados. A montagem foi bastante simples, usou-se uma lente de Fresnel quadrada com 10 cm de lado, e uma guia de onda com 0.5 cm de diâmetro, ambas fixas num suporte óptico. Este método provou ser bastante instável. Era possível verificar a separação de cores no foco da lente, mas era muito difícil manter a parte vermelha do foco na entrada da guia pois era preciso fazer ajustes manuais da inclinação da lente, de poucos em poucos segundos, devido ao movimento da Terra em relação ao Sol. E tão depressa se observava a transmissão de luz vermelha através da guia de onda, como no momento seguinte já se tinha outro tipo de luz a ser transmitida. Desta forma também este método se mostrou inviável para o objectivo desta dissertação.

3.3 Concentrador Óptico

Tendo em conta as limitações dos protótipos apresentados nas secções 3.1 e 3.2, e continuando na linha do aproveitamento da luz solar, decidiu-se optar por um método mais simples e eficaz, sendo o seu único inconveniente o facto de ser mais dispendioso. Pegando no estudo do protótipo da matriz de LEDs, decidiu-se usar um concentrador mas desta vez para concentrar a luz solar, conduzindo uma maior potência de radiação para uma pequena área com um filtro óptico, o qual deixaria passar apenas determinado tipo de radiação. Os três filtros testados eram do tipo dicróicos passa-banda e transmitiam gamas de radiações centradas nos c.d.o. de 650 nm, 660 nm e 850 nm (este último já na gama dos infravermelhos). No capítulo seguinte encontra-se a descrição detalhada deste método.

4 Descrição e Optimização do Sistema Óptico em ZEMAX[®]

Neste capítulo pretende-se descrever a análise computacional feita, em Zemax[®], do estudo e optimização do concentrador solar. Esta fase do projecto foi fundamental para a optimização do protótipo, sem a qual teria sido despendido muito tempo e material numa optimização puramente experimental.

4.1 Análise Não-Sequencial e Traçado de Raios

O traçado de raios consiste numa técnica utilizada em óptica geométrica que permite estudar o percurso de um raio de luz à medida que este interage com superfícies ópticas. Estes raios de luz são uma representação dos fotões emitidos por uma fonte radiante que, dependendo das características da superfície que atingem, podem sofrer diferentes processos, tais como: reflexão, refração e absorção ⁽⁷⁾.

Existem dois modos pelo qual o estudo do traçado de raios pode ser realizado: modo sequencial e modo não-sequencial. No primeiro, os raios seguem uma sequência específica e pré-determinada, seguindo da fonte de radiação para o objecto 1 e de seguida para o 2, e assim sucessivamente até acabar a sequência. No modo não-sequencial, os raios são traçados ao longo de qualquer caminho fisicamente possível, seguindo qualquer ordem ⁽⁵⁴⁾. Ou seja, a ordem com que os raios interagem com cada componente óptico depende exclusivamente do seu percurso. O traçado de raios sequencial tem algumas limitações evidentes em sistemas ópticos mais complexos ⁽⁸⁾, pelo que neste trabalho foi utilizado o traçado de raios não-sequencial que permite calcular a distribuição espacial da potência num ou mais detectores previamente definidos, permitindo calcular a irradiância num determinado objecto.

O software de design e simulação óptica utilizado para este estudo foi o Zemax[®]. Este software permite modelar e analisar sistemas ópticos complexos em 3D, fornecendo informação detalhada sobre o valor de potência e distribuição dos raios no detector, possibilitando assim estudar a viabilidade do protótipo desenvolvido e, ao mesmo tempo, a sua optimização.

Todos os objectos simulados no modo não-sequencial são tridimensionais e podem dividir-se em três tipos: fontes riantes, elementos ópticos geométricos e detectores ⁽⁵⁵⁾. No presente trabalho foram usados os seguintes objectos:

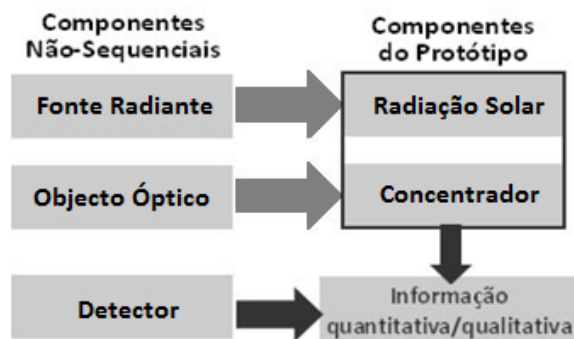


Figura 4.1: Esquema representativo dos vários tipos de componentes usados neste trabalho (adaptado de ⁽¹³⁾).

A fonte radiante, que dá origem aos raios que são emitidos e analisados na simulação, será uma representação da luz solar. Os elementos ópticos geométricos definem os componentes ópticos nos quais os raios podem sofrer fenómenos de absorção, reflexão e refração, sendo que neste trabalho se usa apenas um, o concentrador. Os detectores adquirem a informação qualitativa/quantitativa relativa aos raios que nele incidem ⁽⁵⁵⁾.

Na análise computacional do sistema óptico foi utilizado o detector rectangular (*Detector Rect*). Este tipo de detector pode ter a função de absorver, reflectir, ou não ter qualquer efeito sobre a radiação nele incidente. A resolução da imagem obtida pode ser ajustada pelo número de pixels do detector tendo, consequentemente, influência no tempo total necessário para cada simulação ⁽¹³⁾.

4.2 Radiação Solar - Parâmetros da Fonte de Luz

Como neste projecto a separação de luz é feita através de um filtro óptico não houve necessidade de programar várias fontes de luz para cada um dos diferentes c.d.o. Assim, programou-se uma única fonte de radiação com os c.d.o. definidos na secção 3.2. A tabela *Wavelength Data*, com os comprimentos de onda usados, encontra-se no Anexo A.

Para além dos c.d.o. e respectivos pesos, é necessário definir o ângulo máximo de incidência dos raios solares na superfície terrestre. Este ângulo pode ser calculado recorrendo à distância do Sol à Terra e ao diâmetro do Sol.

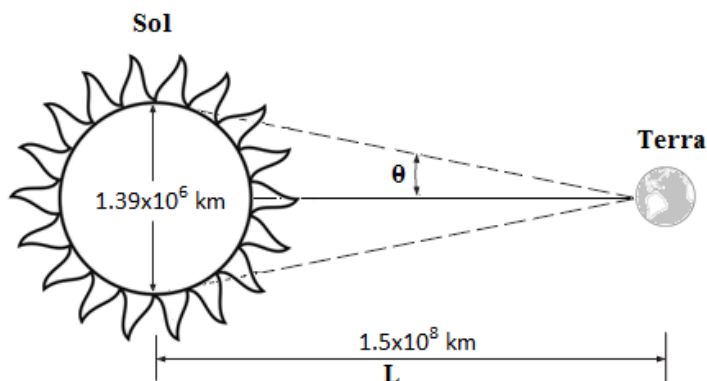


Figura 4.2: Ângulo máximo de incidência dos raios solar na superfície terrestre.

Desta forma, o ângulo máximo de incidência dos raios solares à superfície terrestre é calculado por:

$$\tan \theta = \frac{R_{Sol}}{L_{TS}} \quad (3)$$

De onde se obtém o valor de incidência angular máxima $|\theta| \approx 0.27^\circ$. Assim se vê que a incidência dos raios solares na superfície terrestre não é perfeitamente vertical. Este valor foi introduzido nos parâmetros da fonte solar simulada em Zemax®.

4.2.1 Programação da Fonte de Luz no traçado de raios não-sequencial

Na programação da fonte de luz foi usado o tipo *Source Ellipse*, que é uma fonte plana e circular. Esta foi definida com um raio de 4 cm, o que era suficiente para emitir luz para o interior dos concentradores estudados. Como já foi referido na secção 3.2, a irradiância total do Sol é de 900 W/m^2 . Assim, para que a fonte projectada tivesse o mesmo valor de irradiância, teria que emitir uma potência de 4.52 W. Potência, esta, colocada nos parâmetros da fonte.

Foi também importante definir o ângulo de incidência dos raios solares. Supondo que o protótipo do concentrador a ser construído neste projecto terá uma utilização de, no máximo, 1h seguida e será fixo, é importante saber a amplitude da deslocação do Sol durante esse período de tempo.

Assumindo que, no local e na altura do ano em que o concentrador deste projecto foi testado, o Sol nascia às 7h30 e punha-se às 19h30⁽⁵⁶⁾, pode-se fazer um pequeno cálculo para determinar a amplitude de deslocação do Sol durante 1h.

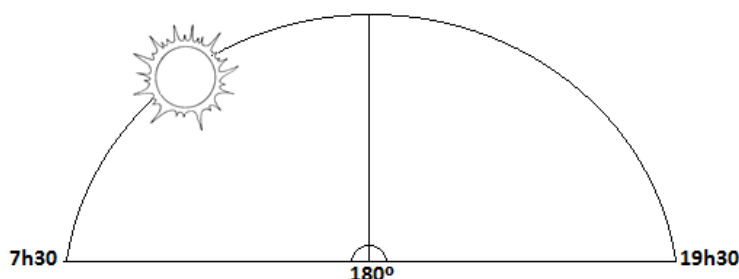


Figura 4.3: Ilustração do percurso do Sol ao longo do dia.

Dividindo a amplitude de 180° pelas 12h de duração do dia, obtém-se uma amplitude de deslocação de 15° por hora. Adicionando a este valor o ângulo máximo de incidência do Sol, calculado anteriormente, vem que, durante 1h o ângulo dos raios solares podem variar até um máximo de 15.27° , assumindo que no início deste intervalo de tempo o concentrador é posicionado de forma a receber os raios o mais próximo da vertical possível.

Assim, projectou-se a fonte de luz de forma a emitir raios com amplitudes de incidência desde -15.27° a $+15.27^\circ$. Esta propriedade é definida pelo parâmetro *Cosine Exponent* no Zemax[®]. A este parâmetro deu-se o valor de 50 pois era o valor necessário para se obter uma distribuição de raios dentro da amplitude pretendida.

4.3 Optimização do Concentrador Solar

A radiação solar, depois de concentrada para uma pequena área, atravessará um filtro óptico, permitindo a transmissão de apenas uma pequena gama de c.d.o. específicos. Com isto, é possível obter-se uma maior irradiância de uma luz praticamente monocromática, à saída do concentrador, cujos efeitos terapêuticos serão analisados mais à frente. Nas secções seguintes serão analisados quatro tipos de concentradores: CPC, e concentradores de secção circular, secção hexagonal e secção quadrada, respectivamente.

4.3.1 Escolha dos Parâmetros do Concentrador

4.3.1.1 Irradiância

Esta grandeza refere-se à potência que uma superfície irradiada recebe por unidade de área ⁽⁵⁷⁾.

Uma vez que a luz à saída do concentrador será, posteriormente, filtrada, a potência à saída diminuirá bastante, pelo que se deve projectar um concentrador para emitir uma irradiância suficientemente alta de forma a garantir resultados experimentais positivos.

4.3.1.2 Material

A característica mais importante do material a ser usado para a construção do concentrador é a sua reflectância. Esta é a proporção entre o fluxo de radiação incidente numa superfície e o fluxo que é reflectido ⁽⁵⁸⁾. Portanto, para o objectivo deste trabalho é essencial que o material a ser usado no concentrador seja um bom reflector.

Nem todos os materiais reflectem igualmente bem todos os tipos de radiação. A Figura 4.4 mostra os valores da reflectância de três materiais em função do comprimento de onda.

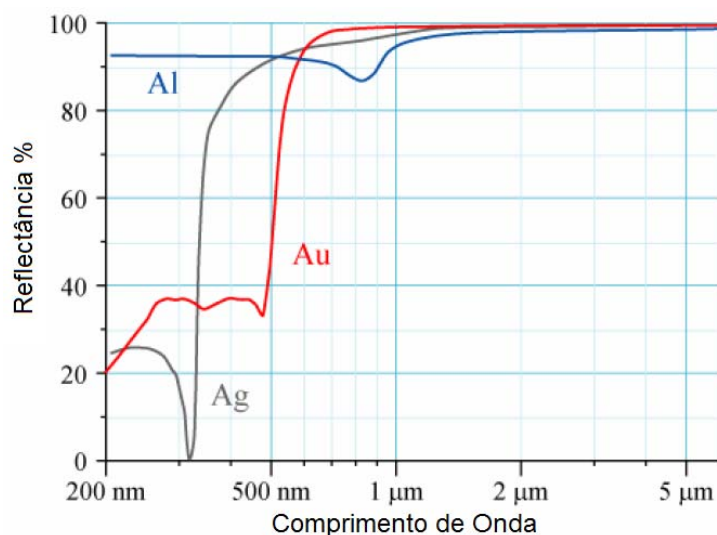


Figura 4.4: Espectro de Reflectância de três materiais: Ag, prata; Al, alumínio e Au, ouro ⁽⁵⁹⁾.

O Alumínio, para além de ser um material relativamente barato, apresenta uma reflectância superior a 86% desde a região do UV até ao infravermelho, sendo aproximadamente de 90% para o comprimento de onda de 660 nm ⁽¹³⁾. No entanto, a prata apresenta uma reflectância ainda mais elevada para esse mesmo comprimento de onda, que é o mais importante no âmbito deste trabalho. O Gráfico da Figura 4.4 ilustra a razão pela qual a prata é amplamente usada como um material reflector para concentradores solares. O ouro, por exemplo, tem uma alta reflexão no espectro dos infravermelhos, o que leva à sua utilização como barreira de radiação em aplicações de isolamento térmico. No entanto, ele absorve a parte azul do espectro visível (daí a sua cor), diminuindo a sua eficácia como reflector solar ⁽⁶⁰⁾.

Desta forma, optou-se por usar um material reflector de alumínio, por ser mais barato, mas com um revestimento de prata, para aproveitar as boas características de reflectância deste elemento.

Para efeitos de simulação e para definir o concentrador como um objecto reflector, foi intruduzida a opção *MIRROR* no tipo de material. O tipo de revestimento (*coating*) foi escolhido para uma reflectância próxima da prata para o c.d.o. de 660 nm, 94% que corresponde à opção *METAL2* no parâmetro *coating*.

4.3.1.3 Forma

Os concentradores CPC, que já foram descritos na secção 2.7.1, são, geometricamente, os concentradores mais eficientes.

Na programação do concentrador foi, então, utilizado o objecto não-sequencial CPC, uma funcionalidade já implementada no Zemax[®]. Neste programa, um CPC é definido por 6 parâmetros ⁽⁶¹⁾:

1. *Abertura radial* - Raio da base menor. Uma vez que o filtro a ser usado tem um raio de 10.5 mm, foi este o valor inserido neste parâmetro.
2. *Ângulo de aceitação máximo* - Supondo que o protótipo a ser construído neste projecto terá uma utilização de, no máximo, 1h seguida e será fixo, é importante que seja capaz de transmitir o máximo de raios solares possíveis mesmo quando o ângulo de incidência dos mesmos for variando ao longo do tempo.

Tal como calculado na secção 4.2.1, o ângulo de incidência dos raios do Sol pode variar até um máximo de 15,27°. Desta forma, foi projectado um CPC com um ângulo máximo de aceitação de 20°. Assim assegura-se que todos os raios que entram no CPC serão reflectidos até à saída posterior, e não serão reflectidos para trás.

3. *Comprimento ao longo do eixo Z* - O comprimento máximo do CPC é dado por

$$L = \frac{a(1+\sin \theta)}{\tan \theta \sin \theta}, \quad (4)$$

onde a é a abertura radial e θ é o ângulo de aceitação máximo⁽⁶¹⁾. Não é possível projectar um CPC demasiado comprido se se quiser manter o raio da base menor fixo. Assim foi escolhido o comprimento máximo permitido e que pareceu ser suficiente: 100 mm.

4. *Número divisões angulares*

5. *Número de divisões longitudinais*

Estes dois parâmetros são necessários apenas para a resolução do desenho em Zemax®, não têm influência na forma do CPC em si.

6. *É volumétrico?* - Este último parâmetro refere-se apenas à questão de o CPC ser ôco ou compacto. Indica-se 1 para uma resposta positiva (se for compacto) ou 0 para uma resposta negativa (ôco). Neste caso preencheu-se este parâmetro com 0.

A Figura 4.5 mostra uma representação do CPC criado com os parâmetros anteriores. O raio da base maior é determinado automaticamente.

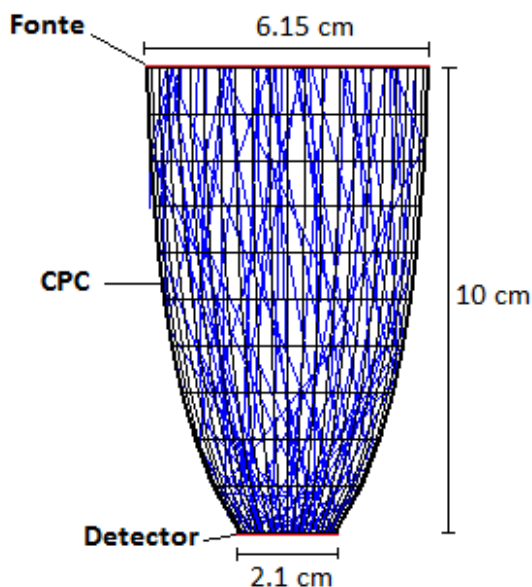


Figura 4.5: Representação do traçado de raios desde a Fonte ao Detector, no interior do CPC.

Medindo a potência da radiação na entrada do concentrador simulado e a potência de saída, é possível determinar a sua eficiência de transmissão. Calculando o quociente entre a potência de saída, 2.2449 W, e a potência de entrada, 2.3601 W, obtém-se uma eficiência de 95.12%. Apesar de este valor ser bastante bom, este concentrador tem uma grande desvantagem. Na Figura 4.6 está representado distribuição de potência à saída do CPC.

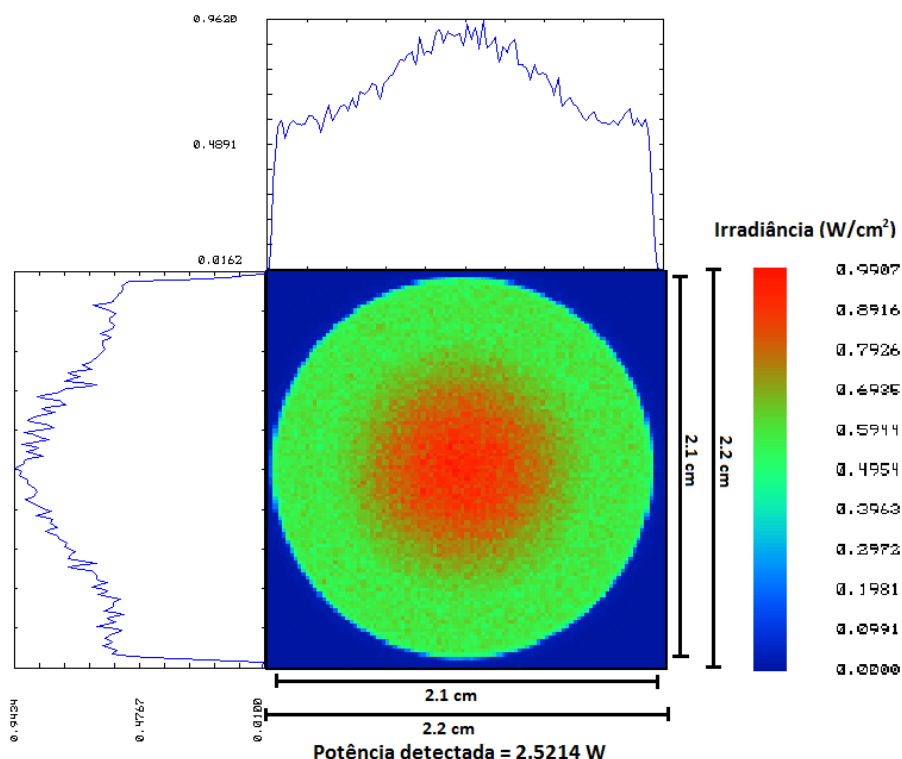


Figura 4.6: Análise da potência detectada e a sua distribuição à saída do CPC.

Facilmente se verifica pela Figura 4.6 que não existe uniformidade na distribuição dos raios à saída do concentrador. A uniformidade da radiação é uma característica importante num dispositivo de luz para usos terapêuticos, pelo que o CPC não é o concentrador ideal para essa função. Como um dos parâmetros do estudo da interacção da luz nos tecidos biológicos é a dose aplicada - irradiância por tempo de exposição (secção 2.3.1) - é importante que a irradiância seja o mais homogeneia possível em toda a área exposta. Caso contrário, a dose será também variante e não será possível ter um controlo sobre a quantidade de radiação que o tecido biológico está a receber.

Pode-se ainda analisar a radiância, em ângulo sólido¹⁴, da radiação de saída do concentrador, cujo gráfico se encontra na figura seguinte.

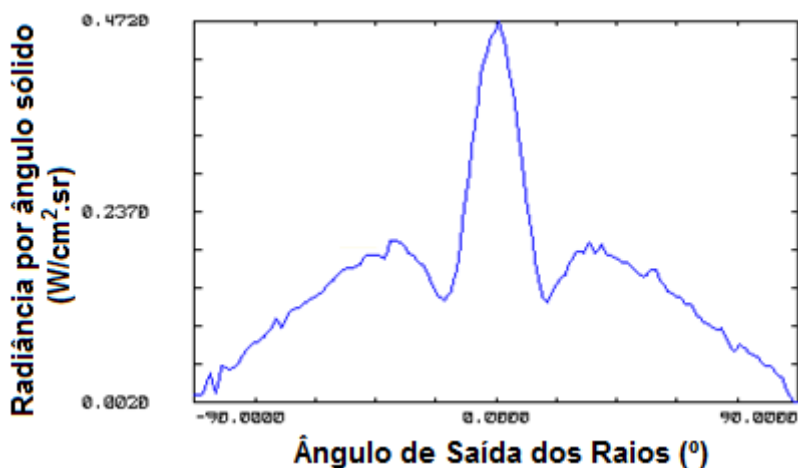


Figura 4.7: Gráfico da Radiância à saída do CPC, em função do ângulo de saída dos raios.

Pela análise da Figura 4.7, verifica-se que muitos raios incidem no detector com ângulos pequenos, quase na vertical, mas a maior parte é reflectida uma vez e incide no detector com ângulos muito grandes, o que provoca a má distribuição dos raios. Um feixe de luz à saída do concentrador com ângulos de dispersão muito grandes não é desejável. Isto porque o alvo biológico no qual será testada a luz não estará encostado à saída do concentrador, mas sim um pouco afastado. Se a luz sair com um grande ângulo de dispersão não chegará a atingir o objecto de estudo.

Estudaram-se, então, outras formas para o concentrador. Foram desenhados em AutoCAD 2010[®] três tipos de concentradores: com secção circular, secção hexagonal e secção quadrada.

Na programação destes concentradores, foi usado o *STL object* que permite importar sólidos desenhados em AutoCAD[®] para o Zemax[®]. O material escolhido foi *MIRROR*, tal como já tinha sido definido para a programação do CPC, também com o *coating* de *METAL2*.

¹⁴ Radiância, em ângulo sólido, expressa a direcionalidade da energia radiante e é a medida da potência por área por ângulo sólido, em esferorradiano (medida SI)⁽⁶⁴⁾, como uma função do ângulo de incidência sobre o tector⁽⁶¹⁾. Assim, este gráfico dá a informação da radiância detectada por cada ângulo de incidência dos raios.

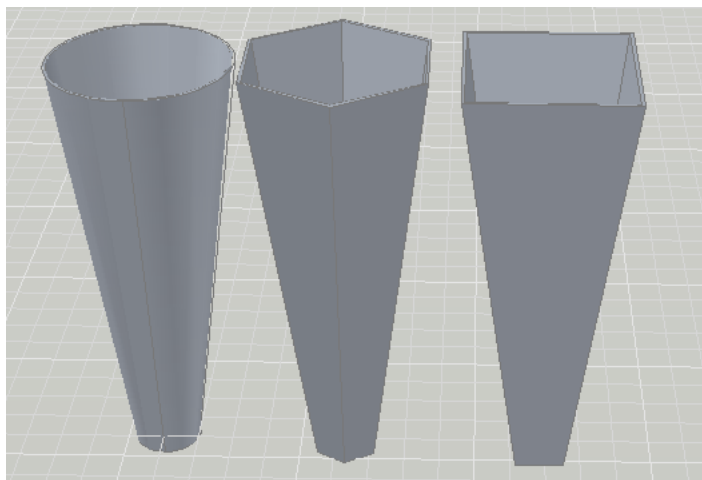

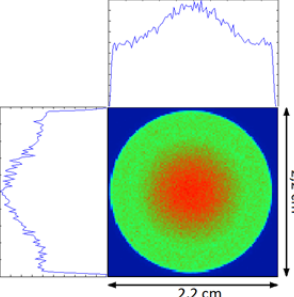
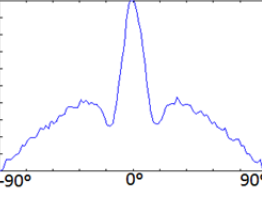
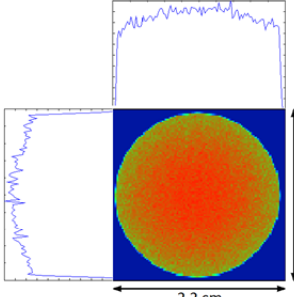
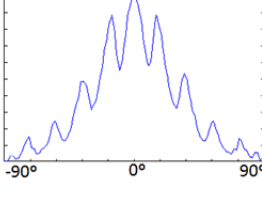
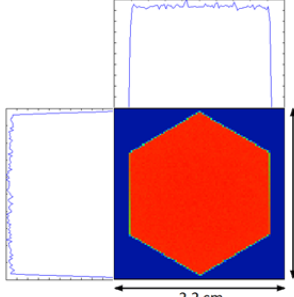
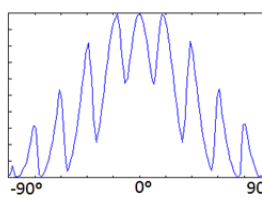
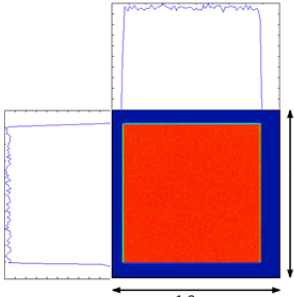
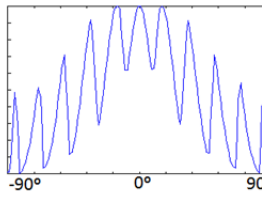


Figura 4.8: Concentradores desenhados em AutoCAD 2010®.

Os únicos requisitos que estes concentradores tinham de manter eram: diâmetro, ou diagonal, da base menor com 20.1 mm, para poder encaixar no filtro, e área da base maior igual à área da base do CPC simulado anteriormente, de forma a receber a mesma potência de radiação. A altura foi o único parâmetro que teve de ser posteriormente estudado. Para comparação entre os novos concentradores e o CPC, estes primeiros foram projectados com 150 mm de altura. A Tabela 4.1 condensa a informação obtida do estudo intensivo dos vários concentradores, através de simulação em Zemax®, e permite tirar conclusões interessantes.

Tabela 4.1: Comparação da performance dos vários concentradores consoante a sua forma.

Tipo de Concentrador	Potência de Saída e Eficiência de Transmissão	Perfil de Distribuição da Irradiância na saída (W/cm^2) 	Radiância em função do Ângulo de Divergência ($W/cm^2.sr$)	Análise
CPC de 10 cm de altura	2.521 W 95.12%			Grande eficiência, mas não há distribuição uniforme dos raios à saída. Muito raios com ângulos de divergência pequenos, mas também muitos maiores que 30°.
Concentrador Cônico de 15 cm de altura	2.443 W 92.28%			Boa eficiência e quase uniformização da distribuição dos raios à saída. Boa distribuição dos ângulos de divergência dos raios, a maioria dos ângulos são menores que 45°.
Concentrador Hexagonal de 15 cm de altura	2.333 W 87.19%			Eficiência um pouco baixa mas boa uniformização da distribuição dos raios à saída. Os ângulos de divergência são em maioria pequenos, mas existem muitos acima de 45°.
Concentrador Quadrangular de 15 cm de altura	2.087 W 78.19%			Eficiência baixa mas boa uniformização da distribuição dos raios à saída. Os ângulos de divergência dos raios variam bastante em todo os ângulos.

Pela análise da tabela anterior, é fácil concluir que tanto o CPC como o concentrado quadrangular devem ser excluídos deste projecto. Este último por ter uma eficiência baixa e raios à saída com ângulos de divergência elevados, o CPC por ter uma uniformização da distribuição dos raios insuficiente e pelos ângulos de divergência dos mesmos também não apresentarem uma boa distribuição.


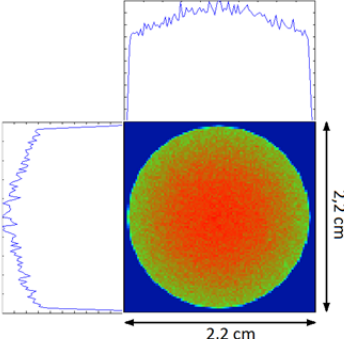
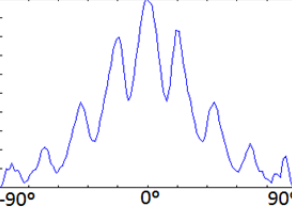
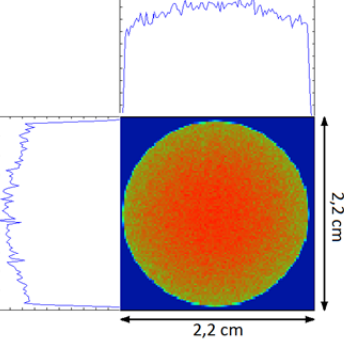
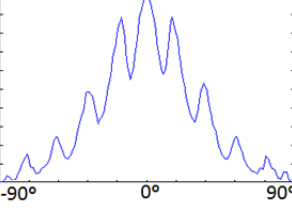
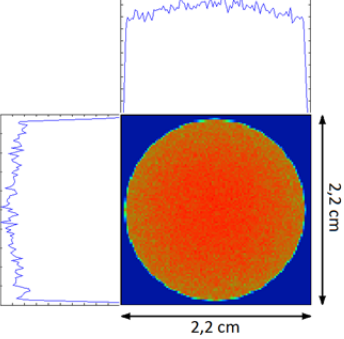
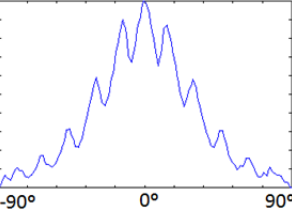
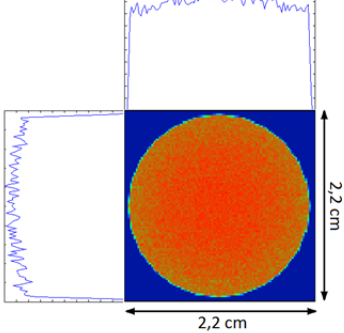
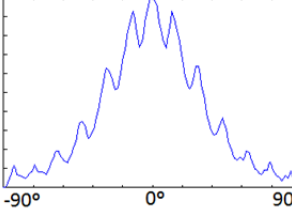
Comparando as performances dos concentradores cónico e hexagonal, conclui-se que o primeiro adequa-se melhor às características pretendidas, por apresentar uma boa distribuição de ângulos de divergência dos raios à saída.

4.3.1.4 Altura

Escolhida a forma do concentrador, foi preciso escolher a altura ideal do mesmo. A tabela seguinte resume o estudo exaustivo sobre a influência da altura do concentrador na sua performance.

Cada imagem resulta de uma simulação em Zemax[®], e cada altura corresponde a um sólido diferente desenhado em AutoCAD[®]. Outras alturas, não referidas na tabela Tabela 4.2, foram estudadas. No entanto, tendo em conta a resposta de proporcionalidade da performance do concentrador em relação à sua altura, apresentam-se apenas alguns dos resultados obtidos neste estudo, incluindo os resultados obtidos para as alturas mínimas e máximas estudadas, e duas intermédias.

Tabela 4.2: Comparação da performance dos vários concentradores cônicos consoante a sua altura.

Altura do Concentrador	Potência de Saída e Eficiência de Transmissão	Perfil de Distribuição da Irradiância (W/m^2) 	Radiância em função do Ângulo de Divergência ($\text{W}/\text{cm}^2.\text{sr}$)
13 cm	2.419 W 91,19%		
15 cm	2.443 W 92,28%		
18 cm	2.474 W 93,25%		
20 cm	2.486 W 93,66%		

Da Tabela 4.2, é fácil concluir que a boa performance do concentrador é proporcional à sua altura. Tanto a distribuição espacial dos raios, como a distribuição dos ângulos de divergência melhoram com o aumento da altura. Como um dos objectivos deste projecto era construir um concentrador facilmente portátil, foi decidido que 20 cm para a altura de um concentrador era uma medida aceitável, e a sua performance suficiente.

Assim, o concentrador que foi construído tem as seguintes dimensões:

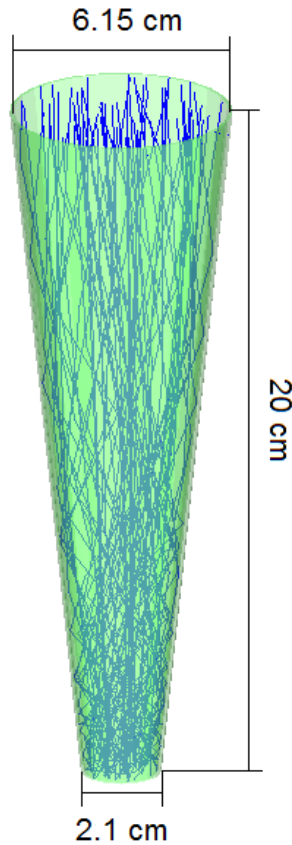


Figura 4.9: Imagem do concentrador, em Zemax®, um pouco translúcido para se poder observar a concentração dos raios no seu interior.

4.4 Estudo em Zemax® da Eficiência de Transmissão do Concentrador Projectado

Depois de projectado, foi estudada a eficiência de transmissão do concentrador.

Para este estudo, definiu-se uma nova fonte de radiação, idêntica à usada nas simulações anteriores, mas desta vez foi escolhido o tipo *Source Two Angle*. Esta fonte tem a particularidade de permitir controlar, de forma mais precisa, os ângulos com que os raios são emitidos, através dos parâmetros *X Half Angle* e *Y Half Angle*.

Desta forma, foram feitas várias simulações variando o ângulo de incidência dos raios, mas apenas numa direcção, no eixo dos y, para a leitura dos resultados ser mais simples. No final de cada simulação foi determinada a eficiência de transmissão do concentrador em relação à amplitude dos raios incidentes. Esta foi calculada pelo quociente entre a potência detectada na saída do concentrador e a potência na entrada do mesmo. Deste estudo, resultou o gráfico da curva de aceitação angular do concentrador.

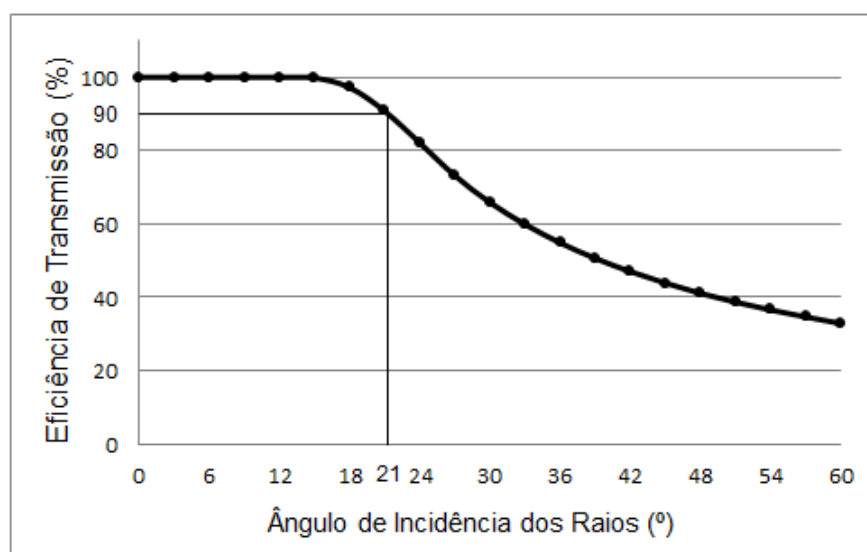


Figura 4.10: Curva de transmissão do concentrador circular resultante de simulações em Zemax®.

Apesar de esta curva não ser próxima da de um concentrador ideal (descrito na secção 2.7.1) até um ângulo de incidência de 15° a transmissão do concentrador circular é praticamente 100%. Para um ângulo de incidência de 18° a eficiência de transmissão é ainda bastante alta, 97%. A eficiência de

transmissão baixa para 90% para ângulos próximos de 21° , pelo que esta será a amplitude do ângulo de aceitação deste concentrador.

Como já referido na secção 4.2.1, ao longo de 1h, a amplitude do ângulo de incidência dos raios solares aumentará até um máximo de 15.27° . Uma vez que o concentrador circular projectado neste trabalho será utilizado apenas por períodos interrompidos de, no máximo, 1h, conclui-se que este está bastante bem adaptado para esta função.

5 Montagem e Análise do Concentrador e dos Filtros

5.1 Processo de Montagem do concentrador

Para construir o concentrador foi necessário, em primeiro lugar, adquirir o material reflector. Este foi comprado numa empresa de tecnologia solar, a WS Energia Lda, que se situa no Taguspark.

Tal como mencionado na secção 4.3.1.2, o material reflector usado é constituído por alumínio revestido a prata, que tem uma reflectância de 94% para o c.d.o. de 660 nm.

O primeiro passo na construção do concentrador foi desenhar a sua planificação para se poder cortar a chapa metálica com a forma correcta, polindo-se, posteriormente, as arestas para um bom acabamento.

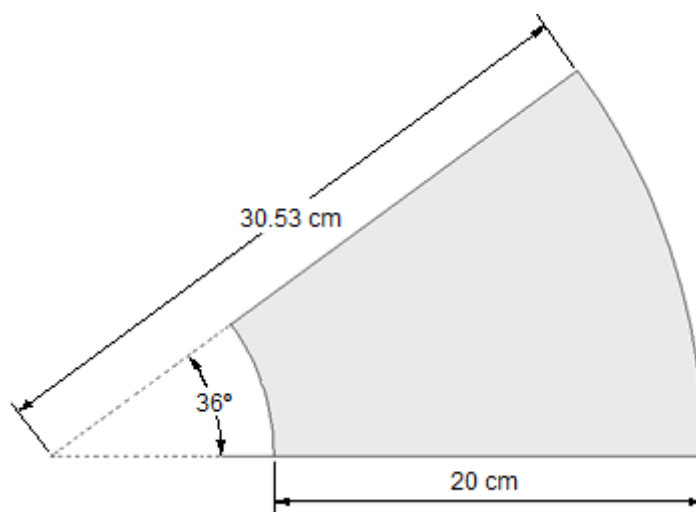


Figura 5.1: Planificação do concentrador circular.

Para enrolar a chapa com a forma pretendida foi necessário usar o método de moldagem. Foram construídos dois moldes, um para o interior, para enrolar a chapa à sua volta, e outro exterior, onde se colocaria a chapa enrolada ao primeiro molde, e assim ganharia a forma pretendida.

O molde interior foi construído através do torneamento de um cilindro de PVC¹⁵.

¹⁵ PVC (Policloreto de Vinil) é um plástico formado por 57% de cloro (derivado do cloreto de sódio) e 43% de eteno (derivado do petróleo)⁽⁶⁵⁾.

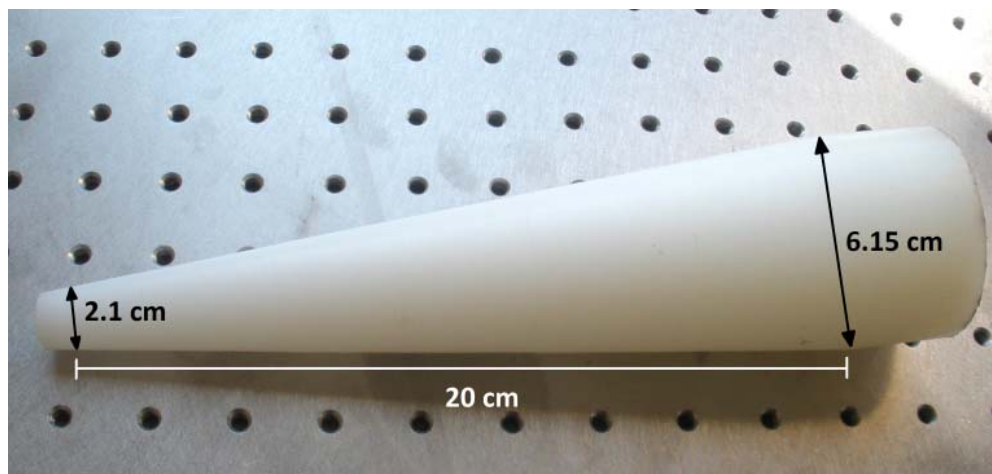


Figura 5.2: Molde interior em PVP.

O molde exterior foi construído mergulhando o molde de PVC num recipiente com cimento fresco. Quando este já estava bem seco, a chapa de alumínio foi enrolada à volta do molde de PVC e depois inserida no molde de cimento. Permaneceu assim durante vários dias, para que o material ganhasse a forma desejada.

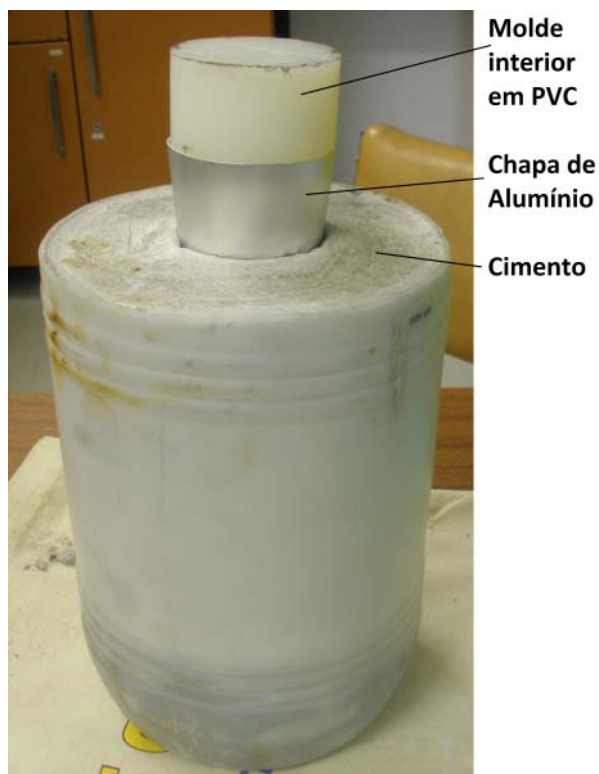


Figura 5.3: Processo de moldagem da chapa de alumínio revestida a prata para ganhar a forma do concentrador pretendido.

O resultado final foi bastante animador, e pode ver-se na Figura 5.4 e na Figura 5.5.



Figura 5.4: Concentrador cilíndrico de alumínio revestido interiormente a prata.

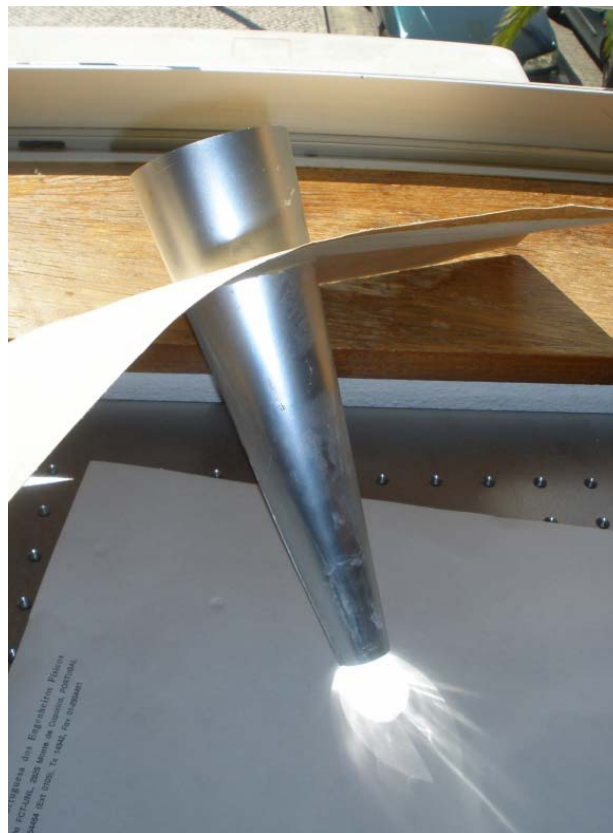


Figura 5.5: Concentração e transmissão de luz solar através do concentrador.

5.2 Eficiência de Transmissão Experimental do Concentrador

Para que se pudesse estudar a luz transmitida pelo concentrador sem a influência directa da radiação que não passa pela entrada do mesmo, colocou-se uma folha de cartão à sua volta, perpendicularmente ao seu eixo vertical, de forma a bloquear a radiação indesejada.

Este sistema mostrou-se bastante útil para alinhar o concentrador com os raios solares. Para isso bastava centrar a sombra do concentrador, no cartão, à volta do mesmo, como está representado na Figura 5.6.



Figura 5.6: Alinhamento do concentrador com os raios solar.

A Figura 5.7 mostra o concentrador montado no suporte com o filtro, pronto a ser testado.

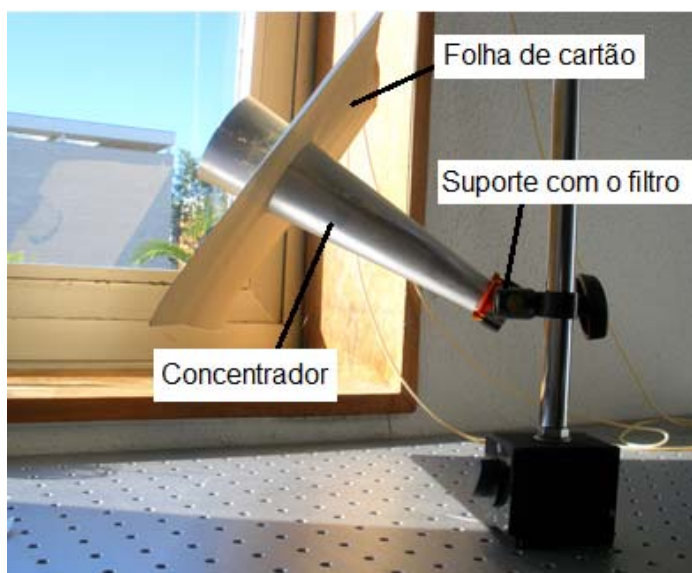


Figura 5.7: Concentrador montado no suporte, com cartão para bloquear a luz indesejada e filtro encaixado no respectivo suporte.

Na tabela seguinte apresentam-se os valores da irradiância solar medida no interior da sala onde se deu a experiência, e da eficiência de transmissão do concentrador projectado. Estes valores foram obtidos experimentalmente com um medidor de potência, e resultam de uma média de quatro medições feitas em quatro dias diferentes.

Tabela 5.1: Valores da Irradiância solar no interior da sala e da eficiência de transmissão do concentrador.

Irradiância Solar (W/m²)	Potência à Saída do Concentrador (mW)	Eficiência de Transmissão do Concentrador (%)
719.86	1508.50	70.54

A irradiância solar apresenta um valor inferior ao habitual num dia de Sol (900 W/m²). Isto deve-se ao facto da medição ter sido feita no interior da sala onde teve lugar a experiência, próximo de uma janela virada para Sul. A luz solar, ao atravessar o vidro da janela, perde alguma potência, nomeadamente a da radiação ultravioleta que é absorvida pelo vidro ⁽⁹⁾. Os restantes c.d.o. atravessam o vidro mas, ao incidirem neste, uma pequena percentagem é reflectida, refractada e absorvida, dependendo do ângulo de incidência e do c.d.o.

A eficiência de transmissão do concentrador não é próxima dos 100%, como era nas simulações, devido ao facto de na prática não ser tão fácil medir a potência de saída do concentrador. Com a luz altamente concentrada no final do concentrador, os raios vão sair dispersos, e por vezes com ângulos muito grandes, o que faz com que nem toda a luz chegue ao detector do medidor de potência, que pela sua forma, não pode estar encostado à saída do concentrador.

5.3 Filtros

Os filtros ópticos usados neste trabalho foram comprados no site da ThorLabs ⁽⁶²⁾. Foram adquiridos três filtros passa-banda, cada um com um c.d.o. central diferente. Foi escolhido um filtro passa-banda centrado em 650 nm, com uma largura de banda passante de 40 nm; um outro com uma banda passante centrada em 660 nm, com largura de banda de 10 nm; e por fim, um filtro com banda passante centrada nos 850 nm, e 40 nm de largura de banda. Assim, no caso do filtro de 650 nm, por exemplo, não é apenas a radiação de 650 nm que este transmite, mas uma gama de c.d.o. centrada nesse valor, com uma largura de banda de 40 nm. Deste modo, os filtros vão passar a ser referidos como: 650±20 nm, 660±5 nm e 850±20 nm, respectivamente.

Estes filtros são montados num anel de alumínio preto anodizado com um diâmetro interno de 2.1 cm. Uma seta gravada na borda do filtro é usada para indicar a orientação recomendada para a transmissão da luz através do mesmo. Embora o filtro funcione com qualquer uma das faces direccionadas para a fonte, é melhor colocar a face revestida na direcção da mesma. Isto irá minimizar quaisquer possíveis danos térmicos devido à absorção de radiação fora da banda passante pelo substrato ou camadas de filtro de vidro colorido ⁽⁶²⁾.

Nas duas figuras seguintes é possível observar as diferenças entre os tipos de luz que cada face dos filtros reflecte ou transmite.

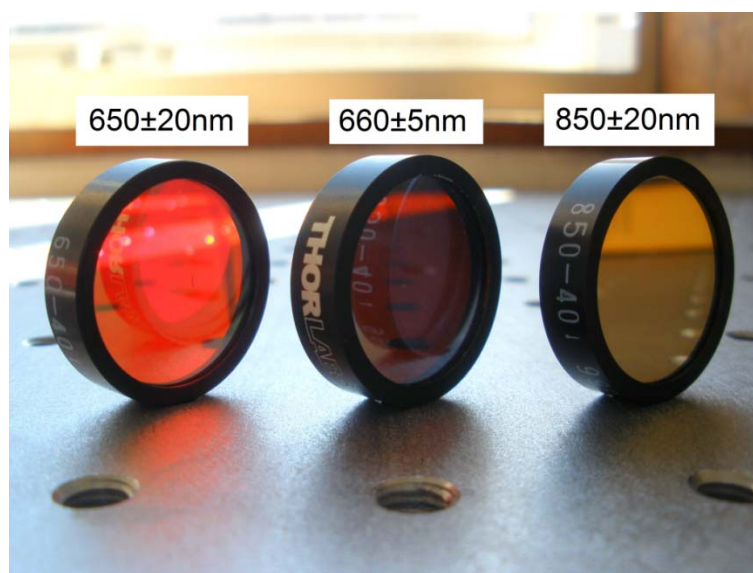


Figura 5.8: Fotografia da face revestida, e mais reflectora, dos filtros.

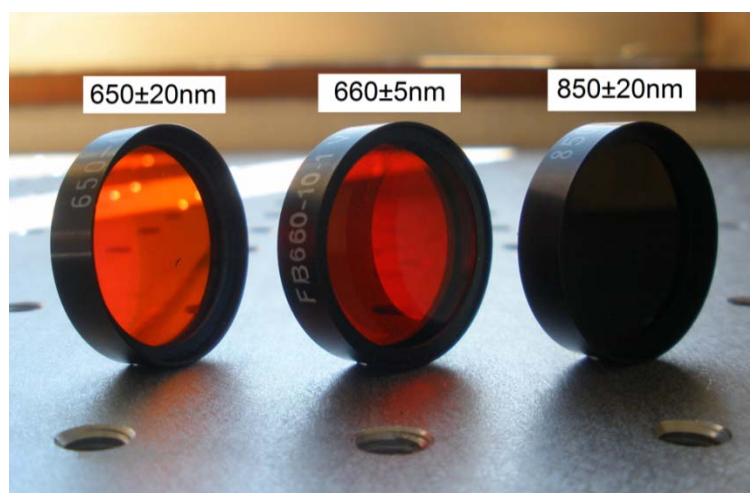


Figura 5.9: Fotografia da face de substrato dos filtros.

Note-se que na Figura 5.9 o filtro de 850 ± 20 nm apresenta-se negro porque esta face apenas transmite radiação infravermelha, que é invisível ao olho humano.

Para esta experiência, foi escolhido o filtro de 660 ± 5 nm pelo facto dos benefícios terapêuticos da luz com este c.d.o. serem bastante reconhecidos, uma vez que corresponde a um dos picos de absorção dos citocromos c oxidase e também ao pico de absorção de uma das formas dos fitocromos, o Fv. Na secção 2.3.2. foi referida a sensibilidade dos citocromos c oxidase às radiações de 850 nm, pelo que também foi usado um filtro com uma banda passante centrada nesta radiação infravermelha. Apesar de não haver na literatura foto-receptores específicos para o c.d.o. de 650 nm, o filtro de 650 ± 20 nm poderá ter um efeito interessante.

Os espectros de transmissão dos três filtros usados estão representados nas três figuras seguintes.

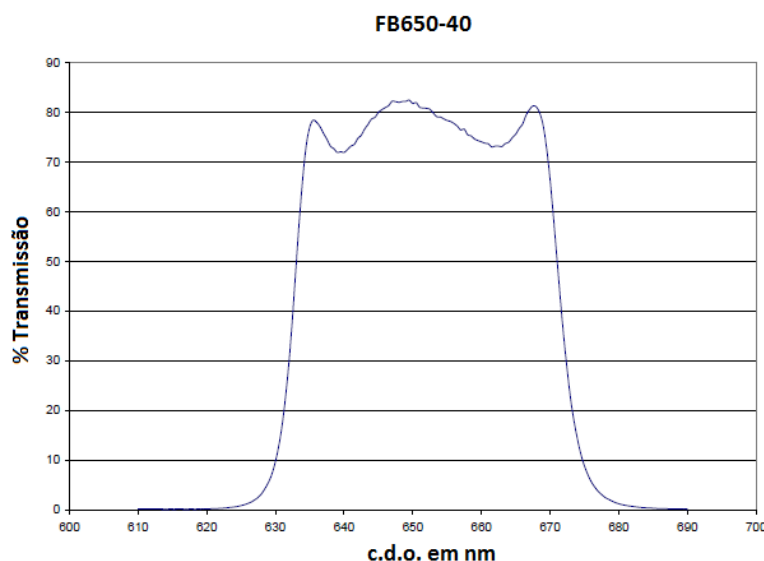


Figura 5.10: Espectro de transmissão do filtro de 650 ± 20 nm ⁽⁶²⁾.

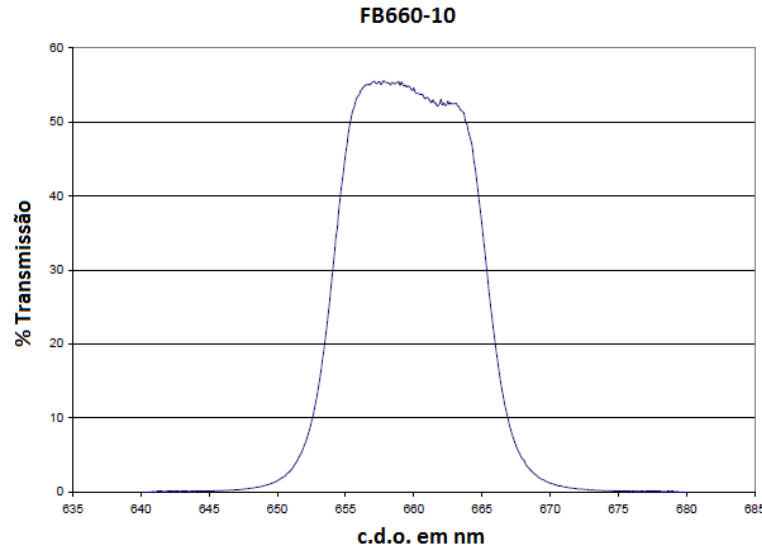


Figura 5.11: Espectro de transmissão do filtro de 660 ± 5 nm ⁽⁶²⁾.

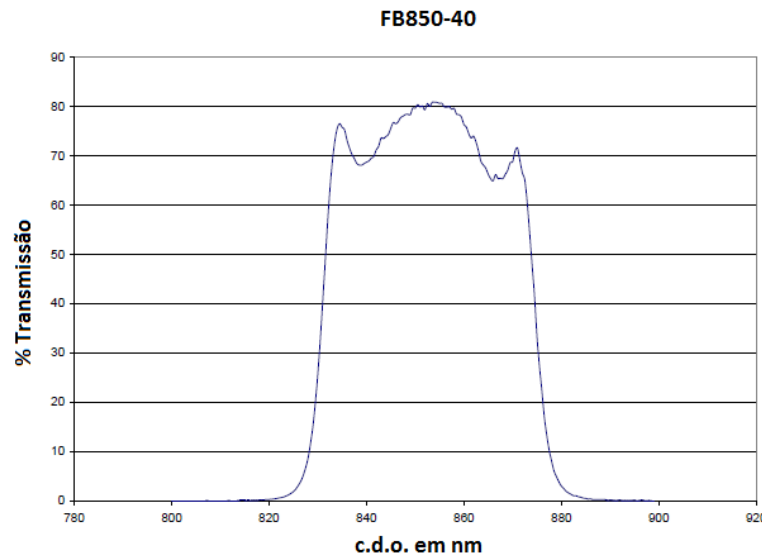


Figura 5.12: Espectro de transmissão do filtro de 850 ± 20 nm ⁽⁶²⁾.

O filtro 660 ± 5 nm, para além de ter uma banda passante mais estreita, o seu índice de transmissão é também menor, chegando a apenas um máximo de 55% no seu pico. Os restantes filtros têm índices de transmissão máximos pouco acima dos 80%. De notar que a banda passante do filtro de 650 ± 20 nm abrange, também, todos os c.d.o. da banda do filtro de 660 ± 5 nm. O espectro de transmissão do filtro 850 ± 20 nm encontra-se totalmente na região dos infravermelhos.

6 Irradiação de Tecidos Biológicos com Luz solar Filtrada

6.1 Material Biológico Usado

Nesta parte experimental foram usados espécimes da planta *Allium Tuberosum*, vulgarmente designada de cebolinho chinês. Trata-se de uma planta herbácea do género *Allium*, ao qual pertencem também, por exemplo, o alho e a cebola. É uma planta de fácil cultivo, crescimento rápido e é bastante usada na cozinha de países do sudeste asiático, na China e no nordeste da Índia, de onde é originária. O consumo desta planta estão também associados alguns benefícios para a saúde, particularmente a redução dos níveis de colesterol no sangue ⁽⁶³⁾.

Foi escolhida esta espécie para a experiência devido ao seu rápido crescimento e pelo facto de as suas folhas terem um formato longo e estreito, o que facilita a avaliação do seu desenvolvimento.

6.2 Estudo do Efeito de Diferentes Tipos de Radiação em Plantas

Neste capítulo foi estudada a influência de três tipos de luz no crescimento de plantas da espécie *Allium Tuberosum*. Para obter as luzes específicas foram usados os três filtros descritos na secção 5.2, separadamente e em plantas diferentes.

Desta forma, foram usados seis espécimes da planta *Allium Tuberosum*: três foram irradiadas pelos filtros de 650 ± 20 nm, 660 ± 5 nm e 850 ± 20 nm, respectivamente; as restantes três plantas foram usadas como controlo, sendo irradiadas pela luz solar não filtrada.

Todas as plantas foram retiradas de um mesmo bolbo de raíz, sendo portanto geneticamente idênticas. Foram também colocadas no mesmo substrato, em quantidades semelhantes de peso e consistência. Foram sempre colocadas as mesmas quantidades de água no substrato, usando um copo medidor. Quando não estavam sob a luz experimental, todas as plantas, incluindo as de controlo, encontravam-se longe da janela do laboratório, recebendo apenas luz ambiente reflectida pelas paredes da sala.

A Figura 6.1 mostra um dos espécimes a ser irradiado por luz solar concentrada e posteriormente filtrada pelo filtro de 660 ± 5 nm.



Figura 6.1: Fotografia de uma das plantas da espécie *Allium Tuberosum* a ser irradiada com luz solar concentrada e filtrada pelo filtro de 660 ± 5 nm.

Todas as plantas foram expostas à radiação experimental por um período de 40 min por dia, durante os quatro dias de duração da experiência. Na tabela seguinte encontram-se registadas as doses de luz que cada planta de teste recebeu por dia, onde a potência à saída dos filtros foi determinada experimentalmente, através de um medidor de potência com um detector circular de 2.1 cm de diâmetro. Estes valores resultaram de uma média de quatro medições feitas em quatro dias diferentes.

Tabela 6.1: Valor das doses aplicadas nas plantas de teste através dos diferentes filtros.

Filtros	Potência à saída do filtro (mW)	Dose recebida pelas plantas de teste (J/cm ²)
650±20 nm	122.075	84.588
660±5 nm	16.725	11.589
850±20 nm	99.800	69.153

Para se poder obter resultados conclusivos nesta experiência, as plantas irradiadas com a luz projectada e as respectivas plantas de controlo deviam receber a mesma dose de radiação. Para tal, além de serem irradiadas durante o mesmo período de tempo de exposição, devem ser expostas à mesma irradiância. Para controlar a irradiância incidente nas plantas de controlo, expostas ao sol, estas foram colocadas debaixo de um cartão com apenas um orifício por onde a luz do sol podia passar. Este orifício tinha, então, a área necessária para que a radiação que chegasse à planta de controlo tivesse a mesma potência que a luz recebida pelas plantas de teste, vinda do filtro.

Na tabela seguinte apresentam-se os valores das áreas necessárias para os orifícios na folha de cartão, de maneira a garantir que as doses recebidas pelas plantas de teste e pelas respectivas plantas de controlo fossem as mesmas.

Tabela 6.2: Valor da área dos orifícios na folha de cartão.

Filtros	Irradiância à saída do filtro (mW/cm ²)	Dose recebida pelas plantas de teste (J/cm ²)	Área do orifício na folha de cartão (cm ²)
650±20 nm	35.245	84.59	0.49
660±5 nm	4.829	11.59	0.07
850±20 nm	28.814	69.15	0.40

A Figura 6.2 mostra uma das plantas de controlo a receber radiação solar de forma controlada.



Figura 6.2: Fotografia de uma planta de controlo sujeita a uma irradiância solar controlada pela introdução de uma folha de cartão com um pequeno orifício.

Com a Figura 6.3: Registo fotográfico do aparato da experiência. pode-se ter uma ideia geral do aparato da experiência.

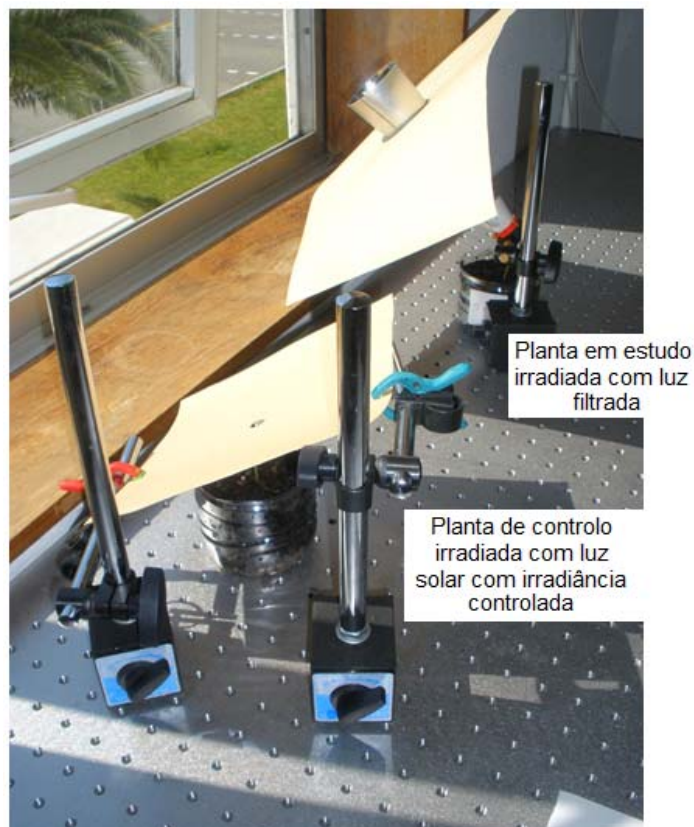


Figura 6.3: Registo fotográfico do aparato da experiência.

6.3 Exposição de Resultados

Esta experiência deu-se num mês de Outubro abençoado por Sol, o que foi bastante positivo para a obtenção de bons resultados.

Na Figura 6.4, Figura 6.5 e Figura 6.6 encontram-se os registos fotográficos das plantas sujeitas à luz solar filtrada pelos três filtros, 650 ± 20 nm, 660 ± 5 nm e 850 ± 20 nm, respectivamente. As cinco fotografias para cada caso de estudo foram retiradas em cinco dias consecutivos, e em cada uma delas, as plantas de teste encontram-se à esquerda e as respectivas plantas de controlo à direita. As fotografias foram tiradas imediatamente antes da exposição à radiação no respectivo dia, com excepção do dia 4 em que as plantas já não foram submetidas à luz experimental. No primeiro dia da experiência, dia 0, as plantas foram cortadas de forma a que tanto a planta de teste, como a respectiva planta de controlo, tivessem exactamente a mesma altura.

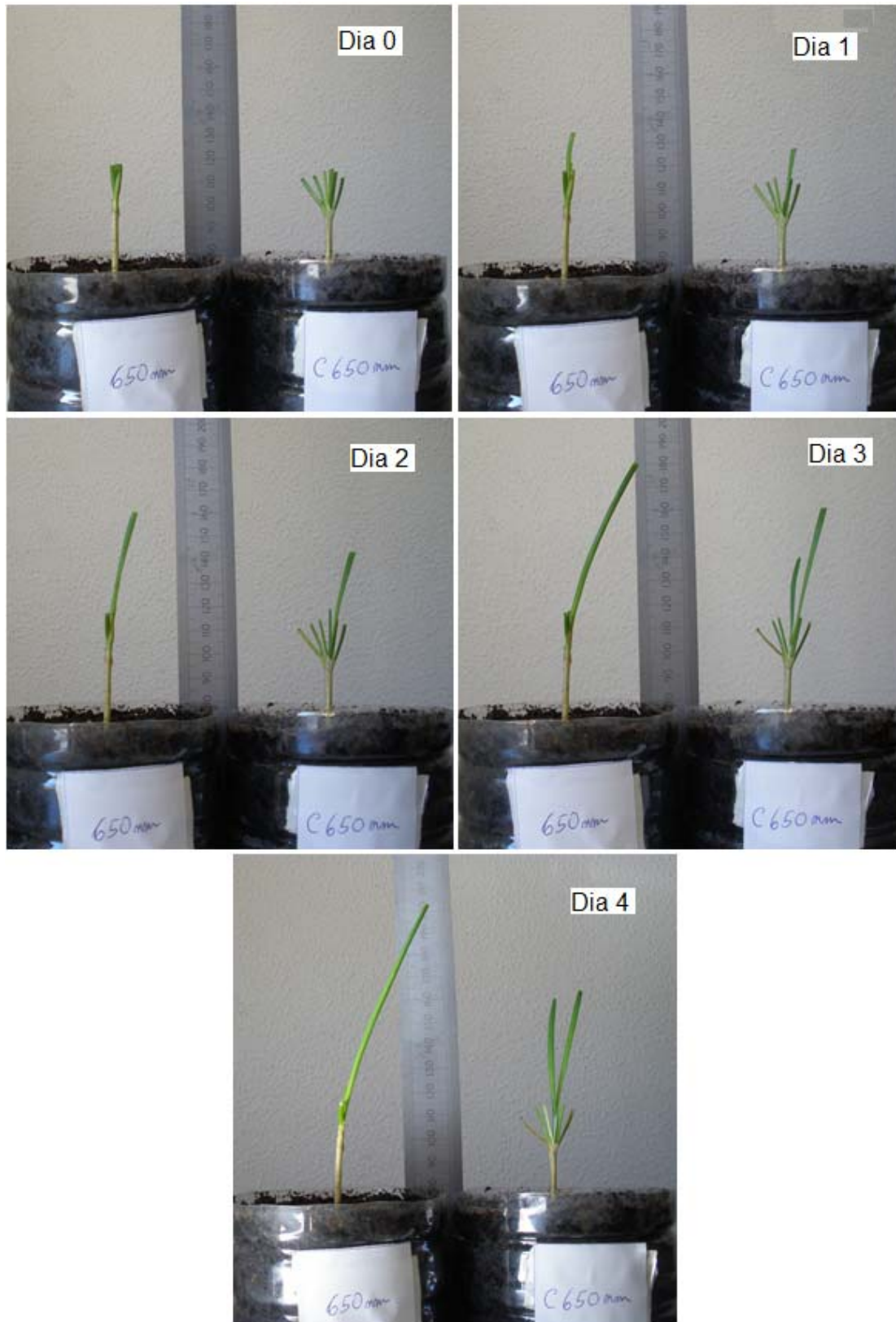


Figura 6.4: Fotografias da planta de estudo sujeita à luz de 650 ± 20 nm, e da respectiva planta de controlo, em cinco dias consecutivos.

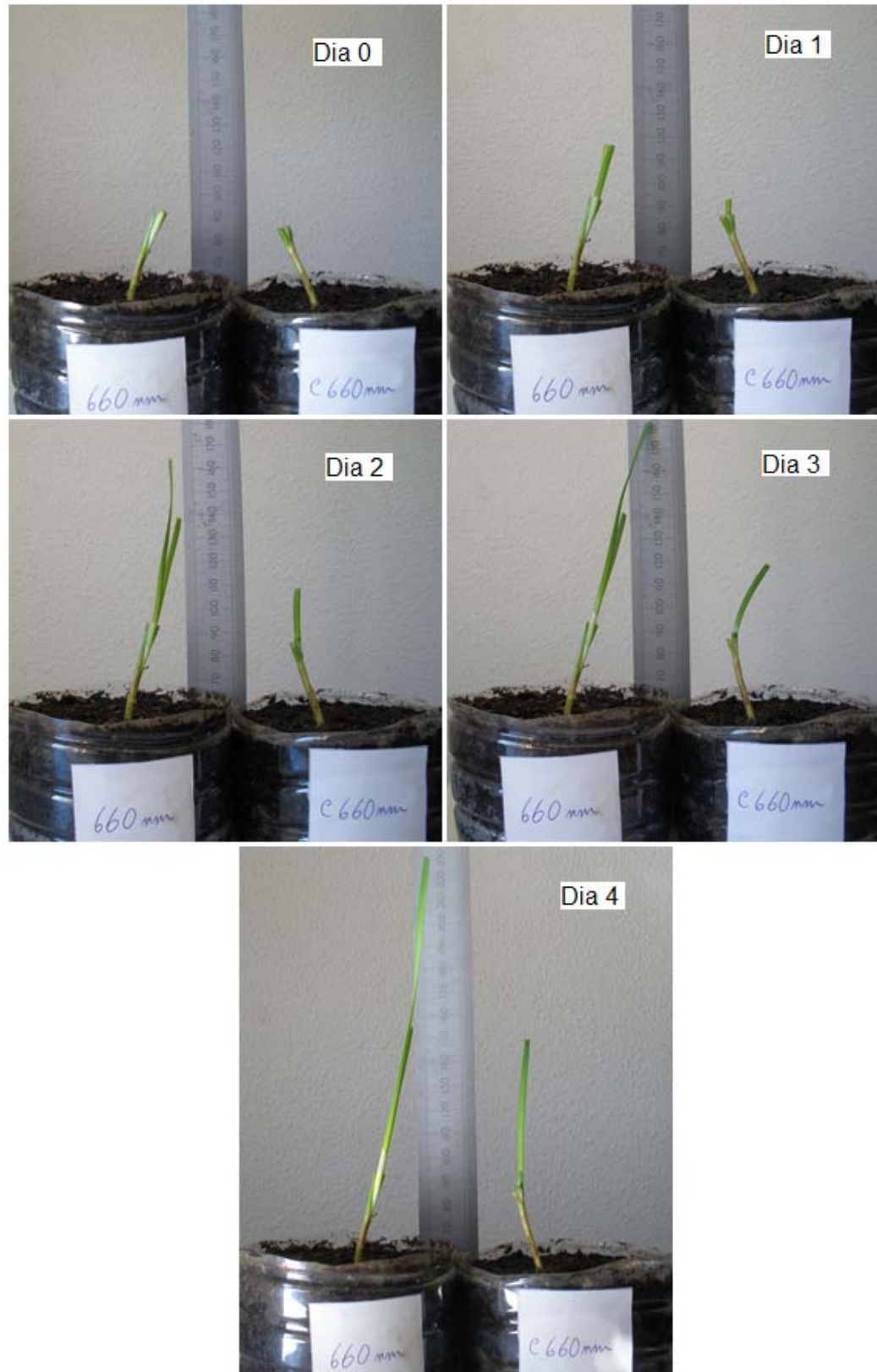


Figura 6.5: Fotografias da planta de estudo sujeita à luz de 660 ± 5 nm, e da respectiva planta de controlo, em cinco dias consecutivos.

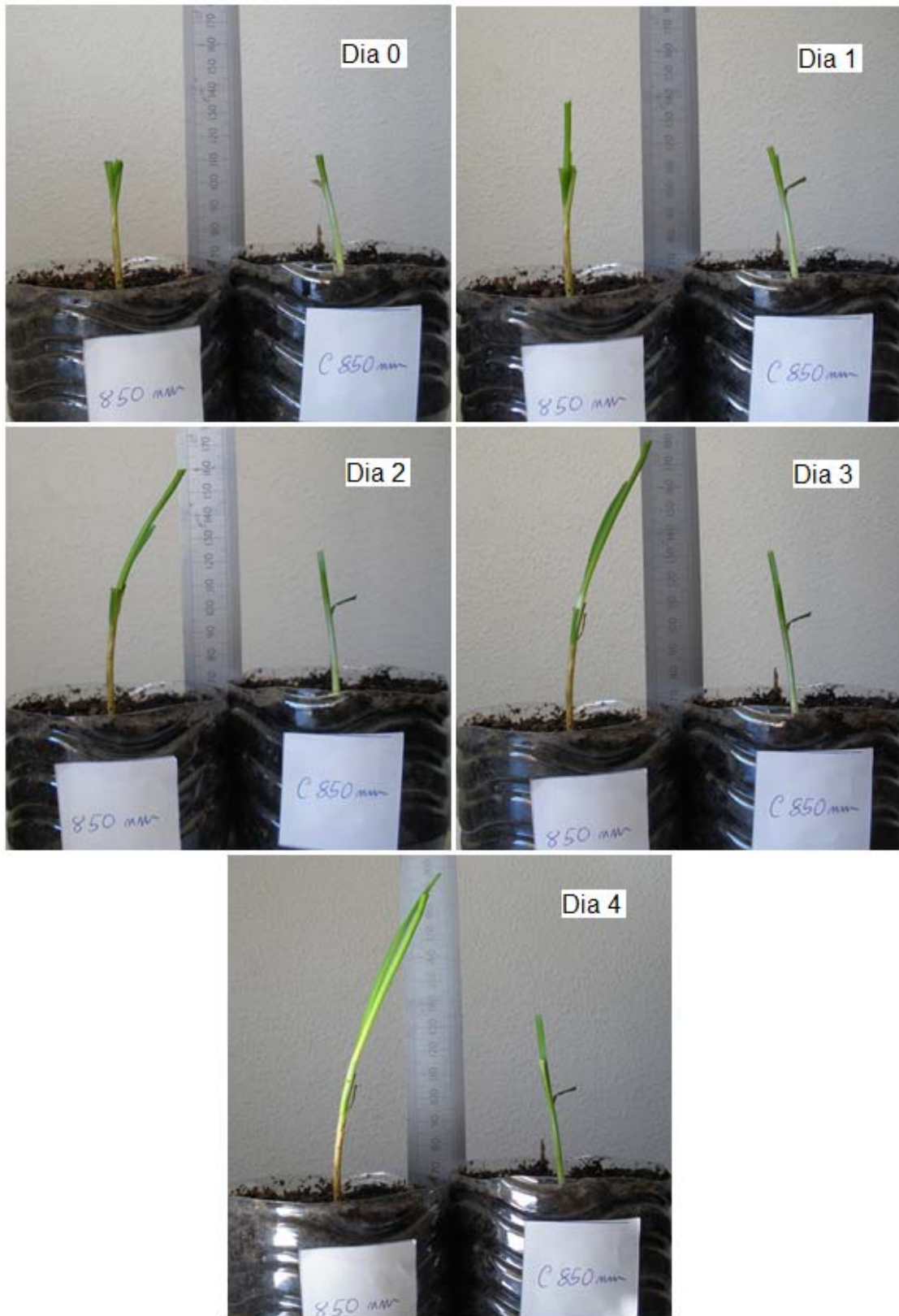


Figura 6.6: Fotografias da planta de estudo sujeita à luz de 850 ± 20 nm, e da respectiva planta de controlo, em cinco dias consecutivos.

Pela visualização das três figuras anteriores, é fácil verificar que, nos três casos, as plantas expostas às luzes experimentais cresceram mais que as respectivas plantas de controlo.

Para analisar melhor o crescimento das plantas, todos os dias, antes de serem submetidas à experiência, foram medidas as suas alturas. No gráfico da Figura 6.7 está registada a variação da altura das seis plantas envolvidas neste estudo: as três plantas de teste (650 nm, 660 nm e 850 nm), a traço cheio, e as respectivas três plantas de controlo (C 650 nm, C 660 nm e C 850 nm), a tracejado.

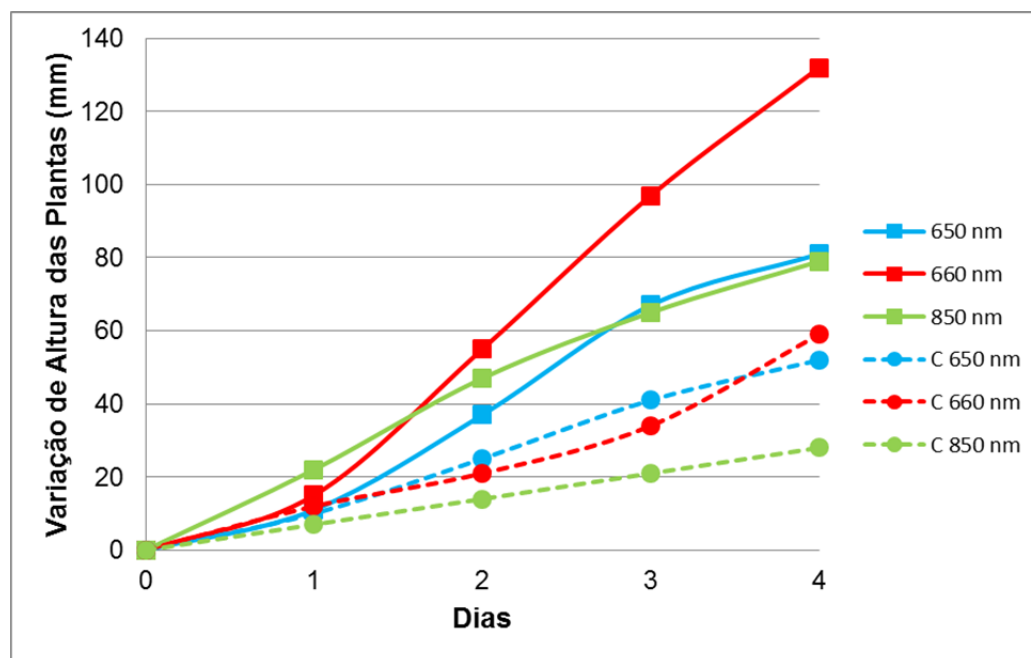


Figura 6.7: Gráfico do crescimento das plantas de estudo em função do c.d.o. a que estiveram sujeitas, e das respectivas plantas de controlo.

É fácil verificar, pelo gráfico da Figura 6.7, que a planta que mais cresceu foi a que esteve submetida à luz que atravessava o filtro de 660 ± 5 nm. Todas as plantas de controlo cresceram menos que as respectivas plantas de teste. A diferença de crescimento entre as plantas irradiadas com radiação solar filtrada pelos filtros de 650 ± 20 nm e 850 ± 20 nm, não é muito significativa.

Estes resultados estão de acordo com a premissa de que a luz de 660 nm acelera o crescimento das plantas. Os c.d.o. de 650 nm e 850 nm também parecem ter alguma influência no crescimento desta espécie de planta, visto estas terem crescido mais que as suas plantas de controlo.

7 Discussão de Resultados e Perspectivas Futuras

Apesar da irradiância do filtro de 660 ± 5 nm ser muito menor que a dos restantes filtros, provocou um crescimento mais rápido na sua planta de teste, o que poderá indicar dois aspectos:

- Uma dose menor é mais indicada para o crescimento deste tipo de plantas. De acordo com o gráfico da Figura 2.3 da secção 2.3.1, existe um valor mínimo para a dose de radiação ao qual as células respondem com actividade máxima. Até chegar a esse valor, os processos celulares vão aumentando a sua velocidade. Mas acima dessa dose ideal as reacções biológicas começam a ficar saturadas o que inibe o desenvolvimento celular podendo ser prejudicial para a célula. Esta pode ser uma das razões pelas quais as plantas expostas à radiação dos filtros de 650 ± 20 nm e de 850 ± 20 nm cresceram menos. Pois receberam doses de 84.59 J/cm^2 e 69.15 J/cm^2 , respectivamente, enquanto que a planta que cresceu mais recebeu uma dose de 11.59 J/cm^2 , com um c.d.o. de 660 nm.
- O c.d.o. de 660 nm é realmente o mais indicado para o alongamento das folhas. De facto, existem muitos dados na literatura que indicam o c.d.o. de 660 nm como a radiação à qual os tecidos respondem com um maior desenvolvimento. A banda passante do filtro de 650 ± 20 nm abrange os c.d.o. da banda passante do filtro de 660 ± 5 nm, no entanto o crescimento da planta de teste exposta à radiação do primeiro foi equivalente ao crescimento da planta exposta à luz saída do filtro de 850 ± 20 nm, ambos menor que no caso da planta exposta ao filtro de 660 ± 5 nm. Apesar do filtro de 650 ± 20 nm transmitir também radiação de c.d.o. de 660 nm, parece não ser tão eficaz como o filtro com uma banda passante mais estreita, centrada nesse valor. Ao ser irradiado com luz saída do filtro de 650 ± 20 nm, o tecido vegetal recebe fotões com c.d.o. de 660 nm assim como de outros c.d.o. próximos. Desta forma, a probabilidade de um foto-receptor absorver fotões com c.d.o. de 660 nm é menor, o que poderá diminuir a eficácia desta luz nas células.

As plantas expostas às radiações dos filtros de 650 ± 20 nm e de 850 ± 20 nm tiveram crescimentos similares. Ambos os filtros têm a mesma largura de banda e ambos abrangem c.d.o. aos quais os citocromos c oxidase são sensíveis, 660 nm e 850 nm (secção 2.3.2). No entanto as doses de radiação fornecidas por eles foram diferentes, pelo que não se pode tirar uma conclusão sobre os seus crescimentos semelhantes.

Todas as plantas de controlo cresceram menos que as respectivas plantas de teste. Este resultado pode ser explicado pelo facto de as plantas de controlo receberem luz solar não filtrada, a qual contém uma grande percentagem de luz azul que pode inibir o crescimento das plantas, como foi visto na secção

2.3.1. Mais uma vez, a probabilidade dos foto-receptores serem excitados por fótons com os c.d.o. ideais para o desenvolvimento celular é mais pequena do que no caso da luz solar concentrada e filtrada.

Posto isto, pode-se afirmar que mais estudos devem ser feitos para concluir sobre todas as incertezas aqui referidas. Várias pesquisas futuras podem ser sugeridas no seguimento deste trabalho:

- Para o estudo sobre o efeito dos filtros usados no crescimento de plantas ser mais conclusivo, todas elas deviam receber a mesma dose de radiação. Para isso, cada planta de teste devia ser exposta durante períodos de tempo diferentes, consoante o filtro a ser testado, ou seja, consoante o valor da irradiância transmitida. Assim, as plantas sujeitas à luz proveniente do filtro de 650 ± 20 nm e 850 ± 20 nm deviam ter um tempo de exposição inferior ao das plantas expostas à luz do filtro de 660 ± 5 nm.
- Podem também ser estudados filtros com transmissão de outros c.d.o., ou apenas diferentes larguras de banda. No caso do c.d.o. de 660 nm, seria interessante perceber qual a largura de banda ideal para o crescimento das plantas, tendo em conta que quanto mais estreita for a banda passante do filtro, menor será também a sua percentagem de transmissão. Isto diminuirá o valor da potência transmitida para a radiação com c.d.o. de 660 nm.
- Antes do início da experiência todas as plantas foram cortadas, para que os espécimes de teste e de controlo tivessem a mesma altura. Houve, então, uma danificação do tecido vegetal. Na secção 2.3.1 refere-se que alguns autores afirmam que os benefícios da luz vermelha apenas têm efeito em tecidos danificados. Por este motivo seria interessante efectuar esta experiência em pequenas plantas saudáveis, sem as cortar.
- É importante perceber qual a dose ideal para o crescimento das plantas, tendo em conta que pode variar com a espécie. Para isso, pode-se estudar a influência de uma mesma radiação aplicada durante períodos de tempo diferentes para cada planta de teste.
- Visto que doses menores podem ser mais vantajosas que doses maiores, a eficiência de transmissão do concentrador não tem de ser tão grande, sendo, talvez, mais importante a homogeneidade da distribuição dos raios com ângulos de saída pequenos, pelo que um importante estudo seria a optimização do concentrador neste sentido.
- Esta experiência ocorreu durante um mês de Outubro com Sol de Verão. Seria interessante repeti-la numa outra altura com um Sol mais fraco e até com céu nublado. Desta forma poder-se-ia estudar a eficácia do método ao longo do ano.

8 Conclusões

Pelos bons resultados obtidos experimentalmente, conclui-se que o protótipo de um concentrador solar fixo acoplado a um filtro foi um método bem escolhido para este trabalho. Este foi usado para o estudo da estimulação do crescimento de plantas através de luz com vários c.d.o, mas o seu uso pode alargar-se à medicina que, no fundo, constituía o objectivo inicial desta tese.

A inovação deste trabalho consiste, de facto, no uso de um concentrador solar fixo que, quando bem alinhado (o que é bastante simples, como se viu na secção 5.2), permite uma irradiância constante ao longo de praticamente 1h. O suficiente para se obterem efeitos nos tecidos biológicos.

Este método traz várias vantagens, tais como:

- Permite o estudo da aceleração do crescimento de plantas de uma forma barata e ecológica, apenas com luz, sem serem usados químicos ou fertilizantes naturais.
- Dado a grande gama de ângulos de aceitação, o concentrador não necessita de um seguidor solar para ter uma boa eficiência de transmissão ao longo de, pelo menos, 1h.
- É mais vantajoso que o método da matriz de LEDs, estudado num trabalho anterior⁽¹³⁾, uma vez que não gasta electricidade e é muito mais portátil, pois não implica o transporte de fios eléctricos nem de uma fonte de tensão.
- É muito prático e fácil de usar, pode ser colocado junto a uma janela e aí ser usado para irradiar plantas ou para algum tratamento médico, como a cicatrização de feridas.
- A construção do concentrador é relativamente simples, e não implica o uso de nenhum aparelho eléctrico.

A única desvantagem poderá mesmo ser o facto de esta técnica só poder ser usada em alturas do dia com Sol, e em espaços iluminados pelo mesmo.

Dada a grande complexidade dos processos biológicos e dos vários parâmetros que definem uma fonte de radiação, ainda muitos estudos precisam ser feitos para se chegar a conclusões concretas sobre a bio-estimulação de tecidos vivos pela luz. No entanto, esta parece ser uma área promissora e em grande expansão, tanto com o uso de luzes artificiais como naturais.

9 Bibliografia

1. **Bernardo, Luís Miguel.** *História da Luz e das Cores Vol 3.* s.l. : Universidade do Porto, 2010.
2. **Tafur, Joseph e Mills, Paul.** Low-Intensity Light Therapy: Exploring the Role of Redox Mechanisms. *Photomedicine and Laser Surgery.* California : s.n., 2008.
3. **Ferreira, Mário.** *Óptica Fotónica.* s.l. : Lidel, 2003.
4. Espectro electromagnético. *Hipertextos em Física.* [Online]
http://nautilus.fis.uc.pt/wwwfi/hipertextos/espectro/hiper_espectro.html.
5. **Hecht, Eugene.** *Óptica.* s.l. : Fundação Calouste Gulbenkian., 1991. p. 105.
6. Sun. *Hyper Physics.* [Online] [http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/solar/sun.html#c1\(1\)](http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/solar/sun.html#c1(1)).
7. **Batista, Nídia Isabel Passinhas.** Técnica de separação de cor para fotocoagulação com luz solar concentrada. *Dissertação de Mestrado.* FCT - UNL, Lisboa : s.n., 2009.
8. **Capote, Ricardo Miguel Ferreira.** Efeitos Cirúrgicos com Radiação Solar Concentrada. *Dissertação de Mestrado.* FCT - UNL, Lisboa : s.n., 2008.
9. Laboratório de Luz Ultravioleta. [Online] <http://www.dfq.pucminas.br/PUV/icone4.html>.
10. Introduction to Light and Energy. *Microscopy Resource Center.* [Online]
<http://www.olympusmicro.com/primer/lightandcolor/lightandenergyintro.html>.
11. **Lima, j.j. Pedro de.** *Biofísica Médica.* s.l. : Imprensa da Universidade de Coimbra, 2005.
12. **Dias, Ivan, et al., et al.** Efeitos da luz em sistemas biológicos. *Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas, Londrina.* 2009.
13. **Almeida, Joana Isabel Iázaro.** Fototerapia com matriz de Díodos Emissores de Luz acoplada a um concentrador. *Dissertação de Mestrado.* FCT - UNL, Lisboa : s.n., 2010.
14. Conceito de irradiância, fluência e energia depositada. *Laserterapia.* [Online]
http://www.nupen.com.br/Revista_port/fund_fisicos4_2.php.
15. *Light-Emitting Diodes (LEDs) in Dermatology.* **Barolet, Daniel.** s.l. : ELSEVIER, 2008, Seminars in Cutaneous Medicine and Surgery, Vol. 27, pp. 227-238.
16. **Sommer, Andrei P., Pinheiro, Antonio L.B. e Mester, Adam R.** Biostimulatory Windows in Low-Intensity Laser Activation: Lasers, Scanners, and NASA's Light-Emitting Diode Array System. *Journal of Clinical Laser Medicine & Surgery.* 2001.
17. **Vieira, Sandra Aparecida Luiz.** Efeito do Laser de Baixa Potência na Cicatrização de Feridas Cutâneas Experimentais. *Dissertação de Mestrado.* França : s.n., 2006.
18. *Mechanisms of Low Level Light Therapy.* **Hamblin, Michael R e Demidova, Tatiana N.** 2006.
19. **Barolet, Daniel.** Light-Emitting Diodes (LEDs) in Dermatology. *Seminars in Cutaneous Medicine and Surgery.* Canada : s.n., 2008.
20. The need for indoor gardening. *My LED lighting guide.* [Online]
<http://www.myledlightingguide.com/Article.aspx?ArticleID=39>.
21. **Alberts, Bruce, et al., et al.** *Biologia Molecular da célula.* São Paulo : Artes Médicas, 1997.

22. Mitochondrias. *Wikipedia*. [Online] Outubro de 2011. <http://pt.wikipedia.org/wiki/Mitoc%C3%B4ndria>.
23. Mecanismos de acção. *Cianetos*. [Online] <http://www.ff.up.pt/toxicologia/monografias/ano0910/cianetos/p4.html>.
24. **Raven, Peter H., Evert, Ray F. e Curtis, Helena.** *Biologia Vegetal*. s.l. : Editora Guanabara Doois S. A., 1978.
25. **Hu, Wan-Ping, et al., et al.** Helium–Neon Laser Irradiation Stimulates Cell Proliferation through Photostimulatory Effects in Mitochondria. *Journal of Investigative Dermatology*. 2007.
26. LED Light Therapy . *heel spurs*. [Online] <http://heelspurs.com/led.html#opti>.
27. **Fukuda, Naoya, Fujita, Mitsuko e Ohta, Yoshitaka.** Directional blue light irradiation triggers epidermal cell elongation of abaxial side resulting in inhibition of leaf epinatsy in geranium under red light condition. *Scientia Horticulturae*. Japan : s.n., 2007.
28. **Whiting, David, Roll, Michael e Vickerman, Larry.** Plant Growth Factors: Light. s.l. : Colorado State University, 2010.
29. **Ankrom, Nikole M.** Growing Plants under Different Types of Light. s.l. : CALIFORNIA STATE SCIENCE FAIR, 2003.
30. **Azevedo, Carlos.** *Biologia Celular*. Porto : Lidel - Edições Técnicas, 1994.
31. **Zeiger, Taiz.** *Plant Fisiology*. s.l. : Sinauer Associates, 1998.
32. **Escobar-Gutiérrez, Abraham J., Combes, Didier e Rakocevic, Miroslava.** Functional relationships to estimate Morphogenetically Active Radiation (MAR) from PAR and solar broadband irradiance measurements: The case of a sorghum crop. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2009.
33. **Khattak, Abdul e Pearson, Simon.** Spectral Filters and Temperature effects on the gorwth and development of chrysanthemums under low light integral. *Plant Growth Regulation*. UK : s.n., 2006.
34. **Khattak, Abdul Mateen, et al., et al.** The Effects of Light Quality and Temperature on the Growth and Development of Geraniums. 2009.
35. Light quality as a developmental cue in plants. [Online] Outubro de 2011. <http://users.aber.ac.uk/lum/phytochrome2003.htm>.
36. **Iacona, Calogero e Muleo, Rosario.** Light quality affects in vitro adventitious rooting and ex vitro performance of cherry rootstock Colt. *Scientia Horticulturae*. 2010.
37. **Miyashita, Y., Kitaya, Y. e Kozai, T.** Efects of Red and Far-Red Light on the Growth and Morphology of Potato Plantlets in vitro: Using LED as a Light Source for Micropropagation. *Environmental Control in Plant Tissue Culture*. Japão : s.n., 1995.
38. **Nhut, Duong Tan, et al., et al.** Responses of strawberry plantlets cultured in vitro under superbright red and blue light-emitting diodes (LEDs). *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*. Netherlands : s.n., 2003.
39. **Yeh, Naichia e Chung, Jen-Ping.** High-brightness LEDs—Energy efficient lighting sources and their potential in indoor plant cultivation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2009.
40. **Schuerger, Andrew C., Brown, Christopher S. e Stryjewski, Elizabeth C.** Anatomical Features of Pepper Plants (*Capsicum annuum* L.) Grown under Red Light-emitting Diodes Supplemented with Blue or Far-red Light. *Annals of Botany*. 1997.
41. Chromatic Aberration. *Microscopy Resource Center*. [Online] <http://www.olympusmicro.com/primer/java/aberrations/chromatic/index.html>.

42. Chromatic Aberration. *Lumenlab*. [Online] [Citação: 23 de Setembro de 2011.] http://lumenlab.com/wiki/index.php?title=Chromatic_Aberration.
43. Introduction to the Refraction of Light. *Micorscopy Resource Center*. [Online] <http://www.olympusmicro.com/primer/lightandcolor/refractionintro.html>.
44. Light Filtration. *Microscopy Source Center*. [Online] <http://www.olympusmicro.com/primer/lightandcolor/filter.html>.
45. Nonimaging optics. *Wikipedia*. [Online] [Citação: 27 de Setembro de 2011.] http://en.wikipedia.org/wiki/Nonimaging_optics#Compound_parabolic_concentrator.
46. **Winston, Roland**. Nonimaging Optics. *Selected Papers on Nonimaging Optics*. s.l. : General Editor, SPIE Milestone Series, 1991, p. 580.
47. **Mills, David R. e Giutronich, John E.** Three-Dimensional Ideal Concentrators For Distant Sources. [autor do livro] Roland Winston. *Selected Papers on Nonimaging Optics*. s.l. : General Editor, SPIE Milestone Series, 1979, p. 226.
48. **O'Gallagher, J. e Winston, R.** Development of Compound Parabolic Concentrators For Solar Energy. [autor do livro] Roland Winston. *Selected Papers on Nonimaging Optics*. s.l. : General Editor, SPIE Milestone Series, 1983, p. 361.
49. **Pelka, David**. Lighting by Design - Solid-state lighting requires specialized optical design for optimal performance. *SPIE Digital Library*. [Online] Agosto de 2005. [Citação: 27 de Setembro de 2011.] <http://spie.org/x15796.xml?pf=true&highlight=x2422&ArticleID=x15796>.
50. Acceptance angle (solar concentrator). *Wikipedia*. [Online] [http://en.wikipedia.org/wiki/Acceptance_angle_\(solar_concentrator\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Acceptance_angle_(solar_concentrator)).
51. Nonimaging Optical Systems. [Online] <http://v5.books.elsevier.com/bookscat/samples/9780127597515/9780127597515.PDF>.
52. Reference Solar Spectral Irradiance: Air Mass 1.5. *Solar Radiation Resource Information*. [Online] <http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am1.5/>.
53. The Multispectral Sun. *Windows to the Universe*. [Online] [Citação: 20 de Abril de 2011.] http://www.windows2universe.org/sun/spectrum/multispectral_sun_overview.html.
54. **Albuquerque, Bráulio Fonseca Carneiro de**. Uma Visão Geral do Zemax: Um Programa de Modelagem e Simulação de Sistemas Ópticos. São José dos Campos, Brasil : Ministério da Ciência e Tecnologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2006.
55. **Pereira, Rui Pedro Fiúza Martins**. Avanços em Esquemas de Bombeamento de Disco Fino. *Dissertação de Doutoramento*. FCT - UNL, Lisboa : s.n., 2010.
56. Hora certa em Lisbon - Portugal. *Hora do Mundo*. [Online] http://www.horadomundo.com/mundo/ciudad/openCity.do?nome=Lisbon&city_id=1894990.
57. Radiometry Measures. *Hyper Physics*. [Online] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/vision/radphocon.html#c1>.
58. Reflectância. *Wikipedia*. [Online] <http://pt.wikipedia.org/wiki/Reflect%C3%A2ncia>.
59. **Fearon, E., Sato, T. e Wellburn, D.** Thermal Effects of Substrate Materials Used in the Laser Curing of Particulate Silver Inks. 2007.
60. Concentrator Optics. *Power from the Sun*. [Online] <http://www.powerfromthesun.net/Book/chapter08/chapter08.html>.

61. ZEMAX Optical Design Program, User's Guide. s.l. : Corporation, ZEMAX Development, 2005.
62. Optical Elements. *Thor Labs*. [Online]
http://www.thorlabs.de/NewGroupPage9.cfm?ObjectGroup_ID=1001.
63. **Choudhary, Raghuveer**. Beneficial Effecto of Allium Sativum and Allium Tuberousum on Experimental Hyperlipidemia and Atherosclerosis. India : s.n., 2008.
64. Esferorradiano. *Wikipedia*. [Online] <http://pt.wikipedia.org/wiki/Esferorradiano>.
65. Policloreto de vinila. *Wikipedia*. [Online] http://pt.wikipedia.org/wiki/Policloreto_de_vinila.
66. Luz Coerente. *Wikipedia*. [Online] http://pt.wikipedia.org/wiki/Luz_coerente.
67. Homeostasis. *Wikipedia*. [Online] <http://en.wikipedia.org/wiki/Homeostasis>.
68. Fibroblast. *Wikipedia*. [Online] <http://en.wikipedia.org/wiki/Fibroblast>.
69. ATP. *Wikipedia*. [Online] http://pt.wikipedia.org/wiki/Adenosina_tri-fosfato.
70. Electron Transport Chain. *Wikipedia*. [Online] http://en.wikipedia.org/wiki/Electron_transport_chain.
71. **Patil, Grete Grindal e Moe, Roar**. Involvement of phytochrome B in DIF mediated growth in cucumber. *Scientia Horticulturae*. Norway : s.n., 2009.
72. Fotossíntese. *Biologia e Geologia*. [Online] Outubro de 2011.
<https://sites.google.com/site/geologiaebiologia/geologia-e-biologia-10o/conteudos-de-biologia/obteno-de-matria/fotossntese-1>.
73. Turgor. *Wikipedia*. [Online] Outubro de 2011. <http://pt.wikipedia.org/wiki/Turgor>.
74. Antioxidante. *Wikipedia*. [Online] <http://pt.wikipedia.org/wiki/Antioxidante>.
75. Fotossistema. *Wikipedia*. [Online] <http://pt.wikipedia.org/wiki/Fotossistema>.

Anexos

Anexo A - Dados da emissão espectral solar

(utilizados na simulação em ZEMAX®)

Wavelength Data

Use	Wavelength (μm)	Weight	Use	Wavelength (μm)	Weight
<input checked="" type="checkbox"/> 1	0.32500000	0.898	<input checked="" type="checkbox"/> 13	1.03450000	11.63
<input checked="" type="checkbox"/> 2	0.37175000	2.137	<input checked="" type="checkbox"/> 14	1.24350000	8.592
<input checked="" type="checkbox"/> 3	0.41225000	3.585	<input checked="" type="checkbox"/> 15	1.61350000	7.787
<input checked="" type="checkbox"/> 4	0.45850000	7.495	<input checked="" type="checkbox"/> 16	2.22250000	3.609
<input checked="" type="checkbox"/> 5	0.50150000	4.614	<input type="checkbox"/> 17	1.10000000	1
<input checked="" type="checkbox"/> 6	0.55300000	10.748	<input type="checkbox"/> 18	0.55000000	1
<input checked="" type="checkbox"/> 7	0.62250000	9.36	<input type="checkbox"/> 19	0.55000000	1
<input checked="" type="checkbox"/> 8	0.67150000	4.199	<input type="checkbox"/> 20	0.55000000	1
<input checked="" type="checkbox"/> 9	0.70300000	4.02	<input type="checkbox"/> 21	0.55000000	1
<input checked="" type="checkbox"/> 10	0.73450000	3.737	<input type="checkbox"/> 22	0.55000000	1
<input checked="" type="checkbox"/> 11	0.78650000	7.889	<input type="checkbox"/> 23	0.55000000	1
<input checked="" type="checkbox"/> 12	0.87850000	9.701	<input type="checkbox"/> 24	0.55000000	1

Select -> F, d, C (Visible) Primary: 1